

山岳地における超短波伝播に関する研究

芳 野 越 夫*

目 次

I. 緒 論	(187)
II. 超短波伝播に関する計算法	(188)
2.1 自由空間	(188)
2.2 地上伝播の伝播式	(193)
2.3 地上波伝播路上に山岳の在る場合	(195)
2.4 山腹斜面反射による電界強度	(204)
2.5 伝播路上に山岳が2つ以上ある場合	(212)
2.6 山岳遮蔽度の大きいときの電界強度	(215)
2.7 伝播通路が長区間地表に沿う場合の電界強度	(216)
2.8 峡谷中の特殊伝播 (谷間回折)	(220)
2.9 地形による多重経路伝播の影響	(223)
III. 山岳地伝播独特の特殊現象	(225)
3.1 垂直偏波の回折による偏波面の偏り	(225)
3.2 不均一大気中の伝播	(225)
IV. 波動理論によるアンテナ利得の問題	(226)
V. 結 言	(228)

I. 緒 言

超短波の電波伝播に関し、最近特に話題となつてゐるテーマは大別して、1. 対流圏内における不均一大気内の伝播、2. 電離層による異常長距離伝播、3. 比較的近距离伝播における地形、地物に対する影響の解析、の三つがあげられる。筆者は昭和 23 年頃より、この第三のテーマの中で特に最近注目されつつある山岳地形における超短波伝播について測定を始め、幾多の興味ある結果を得た。従来超短波伝播に関する解析は C. R. Burrows,¹⁾ M. C. Gray,²⁾ K. Bullington³⁾、松尾⁴⁾等の諸氏により行われ、自由空間、平面大地、球面大地、および刃形回折による山岳伝播式、およびノモグラフが作られ使用されている。しかしこれらの式による算出値は一般に単純な地形にのみ実測値との近似を見るが、地形が複雑になるとかなり異なる結果を示す現況で、この部門の解析はまた緒についたに過ぎない。筆者はこれらの実測値と算出値との差異を修正する実験式を求

* 電波伝播学研究室

め、また特に研究の開発がおくれている溪谷の伝播、凹射面による反射伝播、その他垂直偏波の回折による偏波面の偏り等の測定を試み、昭和31年のマナスル登頂の際の通信回線設計にこの結果を応用し好結果を挙げることができた。⁵⁶⁾⁷⁾しかし、これらの解析には現在幾多の問題もあり、今後更に研究を必要とするものであるが、新たに問題を提起する意味をもあわせてここに現況を総合し、発表する次第である。本論文の2.4節までは現在すでに各方面により詳細な解析が行われた部門、2.5節以後には理論値と実測値との差異が多く、未だ解明されていない部門について述べ、第3章は筆者の測定中に観測した特殊現象で、原因およびその解析法が現在なお不明の分野について記した。

II. 超短波伝播に関する計算法

超短波伝播の電界強度計算には、K. Bullington が1947年にI.R.E.誌に発表した論文⁸⁾中のノモグラフが、最も便利な式として一般に広く用いられており、その後改良が加えられ更に便利に使用されている。

このノモグラフについては、その後多くの文献にその使用法が詳細に述べられているが、本論文を読む場合にその解釈と計算を容易にするためにここに簡単にその概要を述べる。

2.1 自由空間

2.1.1 自由空間における電界強度

半波ダイポールに直角な方向における自由空間電界 E_0 (v/m) は

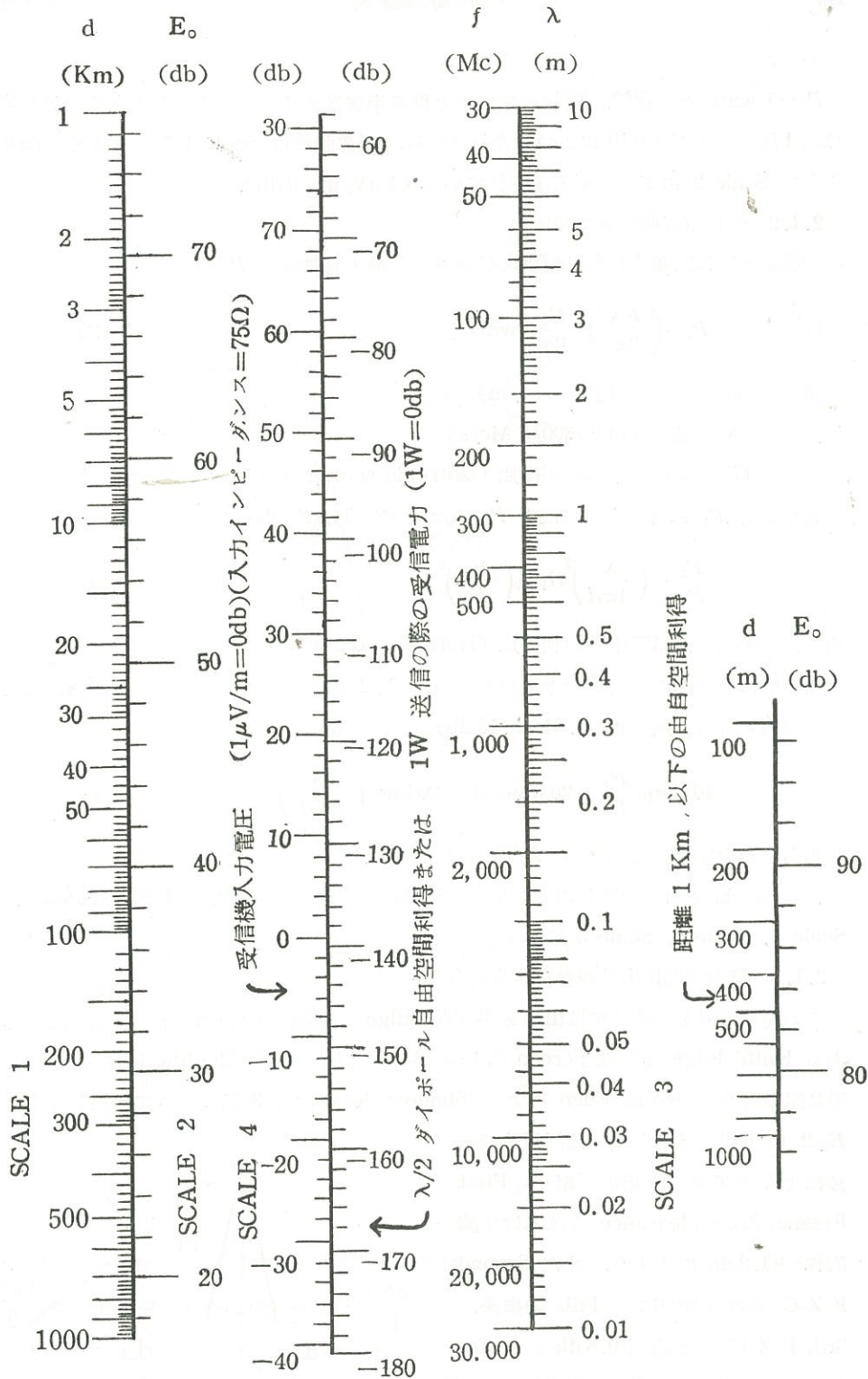
$$E_0 = \frac{7\sqrt{P_1}}{d} \quad (\text{v/m}) \quad (2-1)$$

にて求められる。

但し P_1 : 輻射電力 (watt)

d : 送受空中線間の距離 (meter)

(2-1) は大地が存在する場合には不適当な伝播式であるが、波長に比較し充分高く急峻な山頂相互間において電波を送受する場合にだけ近似的に応用できる。実際には氷蝕によるU字谷をへだてて対峙する二つの尖峰の山頂間で、その谷の深さがスパンよりも深い場合に適合し、例えば France Alps の Chamonix の Aiguille 群の頂上間等が考えられる。我が国ではV字谷が多く地表反射が在るため適用できる例は極めて乏しいが、深谷をへだてた孤立峰間で、筆者が比較的良好な実測例を得たものに、北アルプス剣岳山頂西面——奥大日岳主峰間 [1950年7月24~27日、距離1.1km、周波数146.75 Mc、および52 Mc、出力0.2 W、谷の最大深さ1.2 km (V字谷)] における測定で、実測値が算出値より数デシベル程度低く、アンテナ高さに無影響との結果を得



第1図 送信受信 $\lambda/2$ ダイポールとした場合の自由空間利得 (送信電力:1W としたときは受信電力) を示すノモグラフ

ている。

$P_1=1$ watt とし送信，受信アンテナを共に半波長ダイポールとしたときの電界強度は第 1 図のノモグラフ¹⁾ によつて表わされる。電界強度は Scale 1 に示す距離の函数として Scale 2 にデシベル表示されている ($1 \mu\text{V/m}=0 \text{ db}$)。

2.1.2 受信電界強度と受信電力

一般に完全に調整された受信機に伝送される最大有効電力 P_2 は

$$P_2 = \left(\frac{E\lambda}{2\pi} \right)^2 \frac{G_2}{120} \text{ watt} \quad (2-2)$$

但し， E ：受信電界強度 (v/m)

λ ：波長 (m) $= 300/f(\text{Mc/s})$

G_2 ：受信空中線の利得比 (isotropic source より)

送信電力 P_1 に対する受信電力 P_2 の比は (2-1)，(2-2) より

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_1 G_2 \left(\frac{E}{E_0} \right)^2 \quad (2-3)$$

但し， G_1 ：送信空中線の利得比 (isotropic source より)

自由空間に充分距てて共通の赤道面をもつて $\lambda/2$ ダイポールがあるときの送信電力と受信電力の比は， $g_1=g_2=1.64$ (2.15 db) であるから

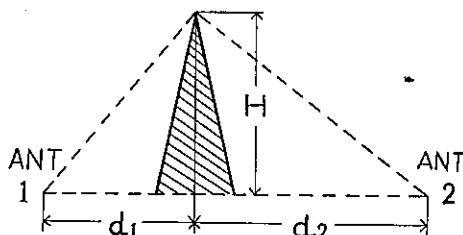
$$10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} = 20 \log_{10} A_0 = 20 \log_{10} \left(\frac{3\lambda}{8\pi d} \right) \quad (2-4)$$

但し，自由空間伝播のため ($E/E_0=1$) とする。

で，この A_0 を自由空間利得といい，(2-4) 式のノモグラフを第 1 図の Scale 3，Scale 4，Scale 5，Scale 6 に示す，

2.1.3 自由空間に山岳の存在する場合

この場合電界を求めるには山岳を Knife Edge に置換し光学的に解く。伝播路上にある Knife Edge または Screen によつて回折が行われると Shadow loss を生ずる。第 2 図のような Knife Edge による Shadow loss は第 3 図のように見透し線上で $E_0/2$, (-6 db) 見透し域では回折波の干渉による電界強度の振動が起り，First Fresnel Zone clearance で電界は理論的に $+1.2 \text{ db}$ 増大する。また Second F-Z-C では理論的に -1 db の損失，3rd. F-Z-C では約 $+0.8 \text{ db}$ の利得増加となり振動的に 0 db に近づく。



第 2 図

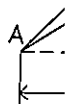
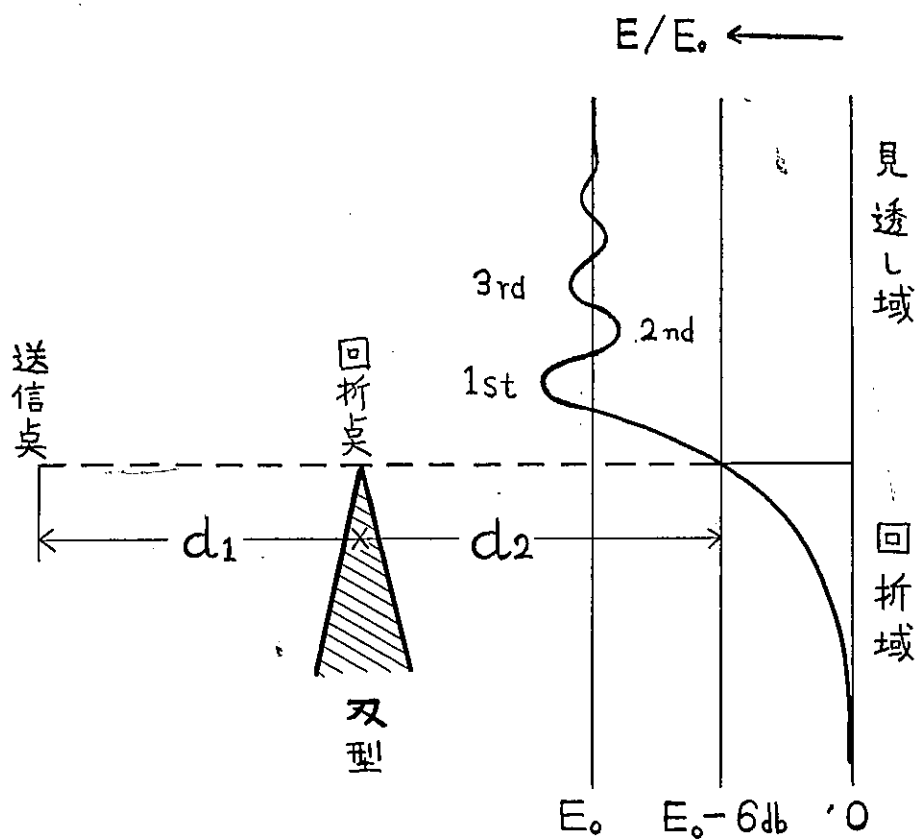
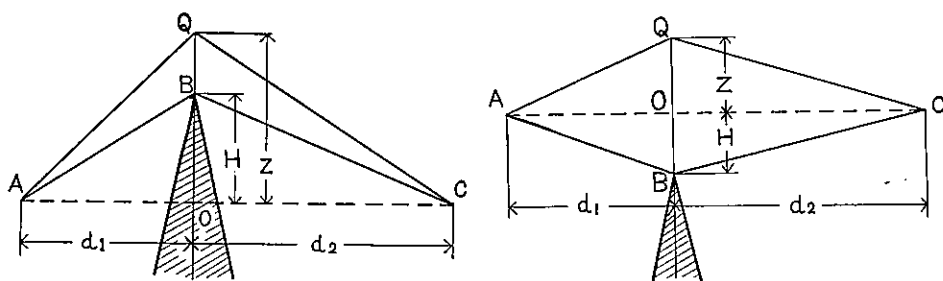


図
記号



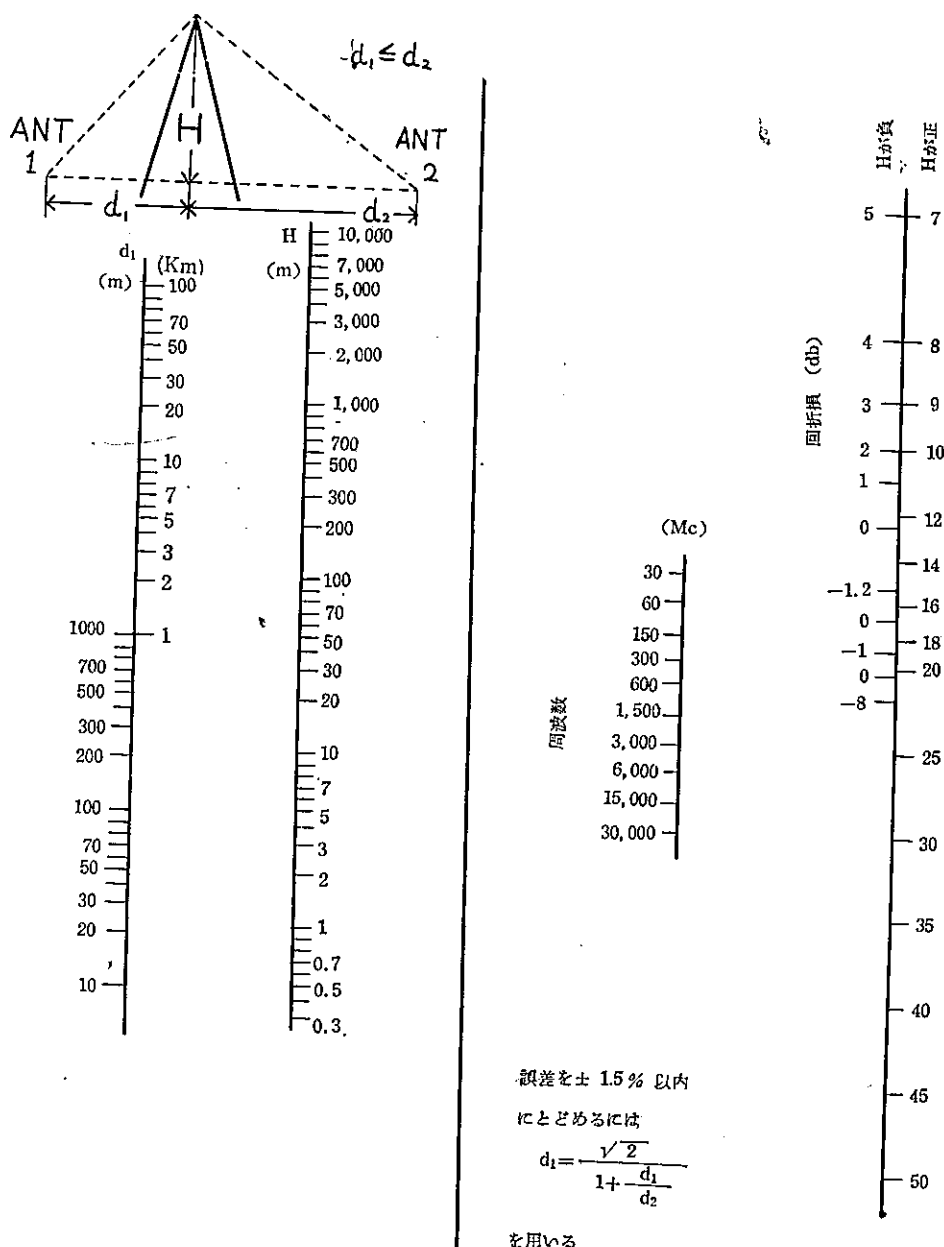
第 3 図



第 4 図

回折域 (diffraction Zone) の回折損 (diffraction loss) は単に減衰する。第4図の記号により電界強度の変動の様子は、

$$E = E_0 \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\omega_0}^{\infty} e^{-jk\omega} d\omega = E_0 S(\omega_0 > 1) = E_0 (S' - S'') \quad (2-5)$$



第 5 図 双型による回折損を求めるノモグラフ

$$\left. \begin{aligned} S &= \frac{1}{2\sqrt{\pi\omega_0}} e^{j\{k(\overline{ABC}) + \pi/4\}} \\ S' &= \frac{1}{2} e^{-jk(\overline{AC})} \\ S'' &= \sqrt{\frac{j}{\pi}} \omega_0 e^{-jk(\overline{ABC})} \end{aligned} \right\} \quad (2-6)$$

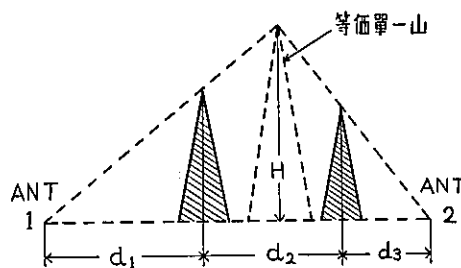
但し、 S および $S'-S''$ を回折係数と呼び (2-5) 式を求めるノモグラフを K. Bullington が求めている。第5図にて $\pm 1.5\%$ 以内の誤差とするには d_1 に $d_1[\sqrt{2}/(1+d_1/d_2)]$ を入れる。

しかし、これは (2-1) 式が適用できるような地形で両山頂間に長い山陵が横たわつているときに用いられるが、一般に大地の反射波が無視し得なくなり正確さが落ちる。

筆者の実測例では理想的な地形に恵まれず、南アルプスの塩見岳頂上一農鳥岳 (回折点) 一白鳳峠間の測定では反射波の影響が現れ、アンテナ高さにより電界変動があり、後述する大地の影響下と同結果となつている。

($d_1=6.5$ km, $d_2=11$ km, 周波数=52 Mc, 出力 1.5 W)

また伝播路上に二つ或はそれ以上の Knife Edge の障害物が存在する場合には未だ厳密な解が得られていない。第6図に示すような H の Knife Edge で置き換えたもの (等価単一山と称す) による実測例 (多数例がある) との比較では、 d_1+d_3 が全体の path の $4/5$ 以上をしめ、 $d_1 > 1/3$ path で、中心附近に二つの



第 6 図

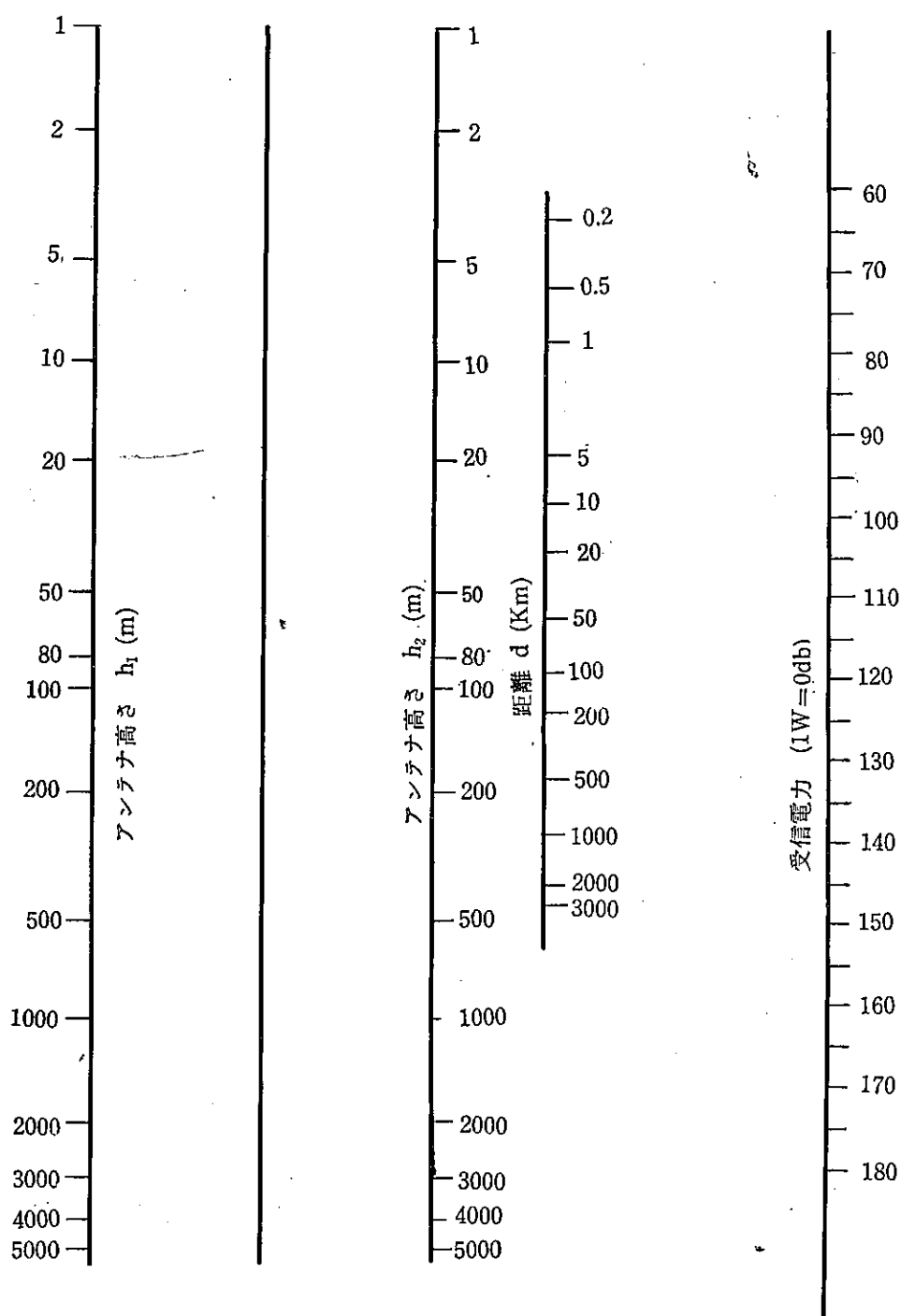
Edge のある時にのみ誤差は約 6 db 以内に入るようになるが、一般には非常に変動が多く今後の研究を大いに必要とする部門である。

2.2 地上伝播の伝播式

2.2.1 平面大地上の伝播

本論文の対称を VHF と規定したために地表波伝播は考慮しない。輻射された電波による平面大地上の電界を構成する主要成分は、直接波、反射波、地表波、および誘導電界または大地の二次的効果等である。すなわち

$$E = E_0 \left[\underbrace{1}_{\text{直接波}} + \underbrace{R e^{j\delta}}_{\text{反射波}} + \underbrace{(1-R) A e^{j\delta}}_{\text{地表波}} + \underbrace{\dots}_{\text{誘導または二次効果}} \right] \quad (2-7)$$



第 8 図 平面大地上の受信電力

(1W=0 db としたときの db 値で負符号省略)

(出力: 1W, 送信アンテナ, $\lambda/2$ タイポールアンテナ)

R : 大地の反射係数で大地とのなす角が小さい場合は略 -1 に等しい.

A : 地表波の減衰定数で周波数および偏波面の形によつて決る.

d : 直接波と反射波の位相差を radian で表わしたもの.

$d > 5(h_1 + h_2)$ のとき $\frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda d}$ radian に等しい.

従つて $d = \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda d} > 0.5$ radian のときには地表波の項は無視される.

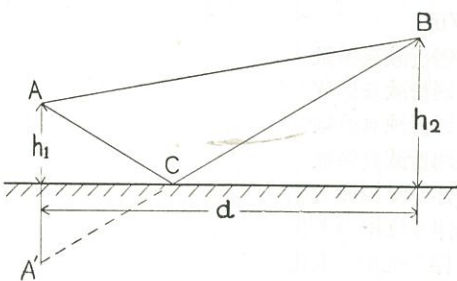
実際には超短波の見越し内の近距離伝播では第7図のように直接波と大地反射波のみ

が考えられる(アンテナが地表より高い)ため受信電界強度は

$$\frac{E}{E_0} \doteq 2 \sin \frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda d} \quad (2-8)$$

一般にアンテナの最大輻射方向では

$$E \doteq E_0 \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda d} \quad (2-9)$$



第 7 図

であり, (2-9) 式を受信電力で表示したノモグラフが第8図である.

2.2.2 実測例との比較による考察

一般に R なる反射係数は大地反射点を一点と考えているが, これは反射点における大地の地形が平坦面の場合には近似的に成立するが, 山岳のように不規則な大地面を形成するような地形においては, Fresnel Zone がかかる区域はもちろんのこと, 可成り広範囲に反射面積を考えなければならない (K. Bullington 1954-8, PIRE). また同時に反射係数が位相的にもずれを生ずる.

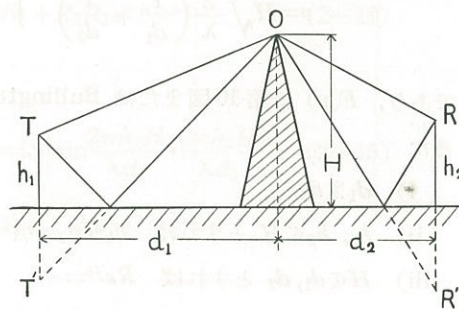
伝播係数の計算は, $d/H(\text{m}) < 8$ の場合には適用に当り充分の注意が必要であり, 特にウォーキ. トーキのようにアンテナ高の低いものに影響が大きい.

以上の諸事項を考慮の上 (2-9) を適用すると, 平坦地では実測値と理論値との間にかなり良好な近似が得られている. その誤差は一般に -6 db 以内であることが多い.

2.3 地上波伝播路上に山岳のある場合

2.3.1 丘陵背後の電界強度

長い山脈を電波が乗り越す場合に, 山脈を Knife Edge に置換えると, 第9図



第 9 図

のように Knife Edge が平面大地上にある場合には大地の反射波を考慮せねばならない。この場合の電界強度の計算方法は Schelleng¹²⁾ が若干解析を試み、のちに K. Bullington がノモグラフを作成しているが、実測値との誤差が大きいため、現在では以下のように基本式をおいている。

$$\left| \frac{E}{E_0} \right| = |S_1 e^{j\eta_1} + R_2 S_2 e^{j(\eta_2 - \zeta_2 + \theta_2)} + R_3 S_3 e^{j(\eta_3 - \zeta_3 + \theta_3)} + R_2 R_3 S_4 e^{j(\eta_4 - \zeta_4 + \theta_4)}| \quad (2-10)$$

- 但し、
 E : 受信電界強度 (V/m)
 E_0 : 自由空間電界強度 (V/m)
 S_1 : 伝播路 TOR における廻折減衰係数
 S_2 : 伝播路 TOR' における廻折減衰係数
 S_3 : 伝播路 T'OR における廻折減衰係数
 S_4 : 伝播路 T'OR' における廻折減衰係数
 η_1 : 伝播路 TOR の廻折に伴う位相の変化
 η_2 : 伝播路 TOR' の廻折に伴う位相の変化
 η_3 : 伝播路 T'OR の廻折に伴う位相の変化
 η_4 : 伝播路 T'OR' の廻折に伴う位相の変化
 R_2, R_3 : 通路 OR' および T'O の大地における反射係数
 θ_2, θ_3 : 通路 OR' および T'O の反射による位相の変化
 ζ_2 : TOR と TOR' の通路差を位相に換算した数
 ζ_3 : TOR と T'OR の通路差を位相に換算した数
 ζ_4 : TOR と T'OR' の通路差を位相に換算した数

この各因子を得るには、次の仮定を設ける。回折による位相変化 η は

$$\eta = f(v) + \frac{\pi v^2}{2} \quad (2-11)$$

によつて求められる。なお、

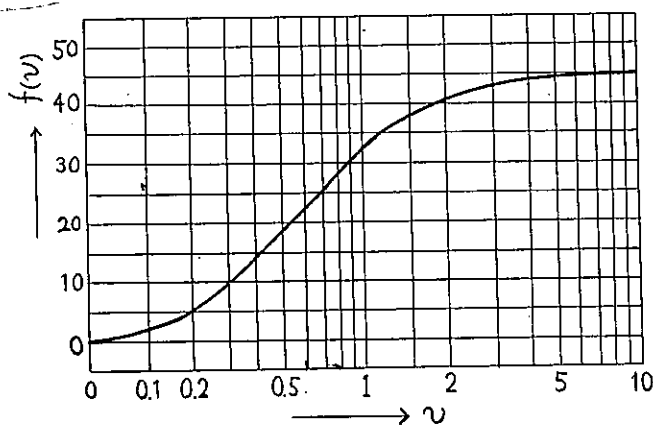
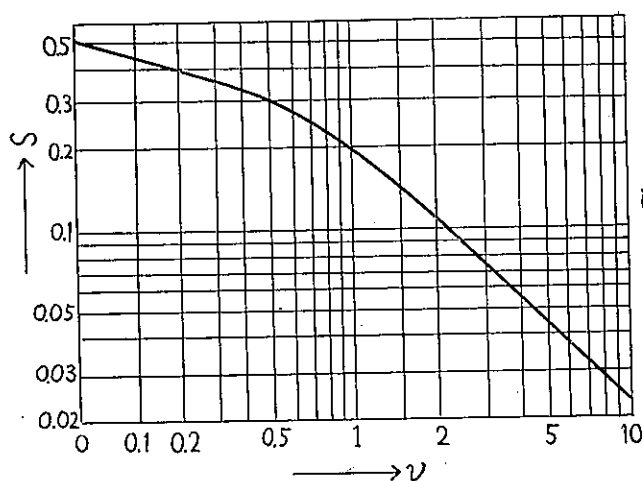
$$\left. \begin{aligned} S &= F(v) \\ v &= H \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \end{aligned} \right\} \quad (2-12)$$

であり、 $F(v)$ は第 10 図または Bullington¹³⁾ のノモグラフにて求められる。

また

- i) $d_1 \gg d_2$
- ii) $h_1, h_2 \ll H$ とすれば $\eta_1 \doteq \eta_2 \doteq \eta_3 \doteq \eta_4 \doteq \eta$, $S_1 \doteq S_2 \doteq S_3 \doteq S_4 \doteq S$
- iii) $H \ll d_1, d_2$ とすれば $Re^{j\theta} = -1$
- iv) $H \ll d_1, d_2$ で $h \ll d_1 d_2$ とすれば $\zeta \doteq 4\pi h H / \lambda d$

とすると (2-10) は



第 10 図

$$\left| \frac{E}{E_0} \right| = S |1 - e^{-j\zeta_2} - e^{-j\zeta_3} + e^{-j(\zeta_2 + \zeta_3)}| \quad (2-13)$$

受信点が山岳に接近した場合には、特に垂直偏波では $Re^{j0} = -R$ とおくと

$$\left| \frac{E}{E_0} \right| = S |1 - R_2 e^{-j\zeta_2} - R_3 e^{-j\zeta_3} + R_2 R_3 e^{-j(\zeta_2 + \zeta_3)}| \quad (2-14)$$

(2-13) を変形すると

$$\left| \frac{E}{E_0} \right| = 4S \left| \sin \frac{\zeta_2}{2} \cdot \sin \frac{\zeta_3}{2} \right| = 4S \left| \sin \frac{2\pi h_1 H}{\lambda d_1} \cdot \sin \frac{2\pi h_2 H}{\lambda d_2} \right| \quad (2-15)$$

(2-15) によつて丘陵背後の電界強度を求めることができる。

更に変形して、

$$\left| \frac{E}{E_0} \right| = S \left| 2 \sin \frac{2\pi h_1 H}{\lambda d_1} \cdot 2 \sin \frac{2\pi h_2 H}{\lambda d_2} \right| \quad (2-16)$$

とすると $|2 \sin 2\pi h_1 H / \lambda d_1|$ は平面大地上に h_1 および H の空中線のある場合の自由空間電界に対する伝播損失を表す。 $|2 \sin 2\pi h_2 H / \lambda d_2|$ も同様である。従つて (2-15) は

$$\begin{aligned} \text{山稜背後の伝播損失} &= \text{送信点山稜間の損失} + \text{山稜の Shadow Loss} \\ &+ \text{山稜・受信点間の損失} \end{aligned}$$

即ち、山稜の両側における伝播損失は各々の側の伝播条件によつて独立に別個に求め直列に結合したものと考える。

$$\left[\begin{array}{l} \text{K. Bullington は平面大地上伝播に対する損失を計算しノモグラフを作つており} \\ E = 2S'E_{pt} = 2S'E_0 \left| 2 \sin \frac{2\pi h_1 h_2 H}{\lambda(d_1 + d_2)} \right| \\ \text{なる式によつてゐる。} \end{array} \right]$$

さらに (2-15) において

$$\left| \sin \frac{2\pi h_1 H}{\lambda d_1} \right| = 1, \quad \left| \sin \frac{2\pi h_2 H}{\lambda d_2} \right| = 1$$

すなわち、

$$\begin{aligned} \frac{2\pi h_1 H}{\lambda d_1} &= \frac{(2n+1)\pi}{2}, & \frac{2\pi h_2 H}{\lambda d_2} &= \frac{(2n+1)\pi}{2} \\ (n=0, 1, 2, 3, \dots) \end{aligned}$$

という条件が満足されたとき最大電界強度が得られ、この条件を満足する送信空中線高を $h_{1\text{opt}}$ 、受信空中線高を $h_{2\text{opt}}$ とすると、

$$\begin{aligned} h_{1\text{opt}} &= \frac{\lambda d_1}{4H} (2n+1), & h_{2\text{opt}} &= \frac{\lambda d_2}{4H} (2n+1) \\ (n=0, 1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \quad (2-17)$$

この場合の電界強度の最大値 E_{max} は

$$E_{\text{max}} = 4S|E_0| \quad (2-18)$$

(2-18) は、自由空間電界の 4 倍から Knife Edge の Shadow loss を減じたものとなる。

この結果から (2-17) の $h_{2\text{opt}}$ の受信空中線高にて電界は最大になり、また山稜に近い程 $h_{2\text{opt}}$ の間隔が小さく、1st $h_{2\text{opt}}$ が低い高さとなる。したがつて、山稜背後の近くにて山岳通信を行う場合には空中線高を上下に適当に調節することにより、比較的低い空中線で非常に良好な電界強度が得られる可能性がある。またウォーキ・トーキの

場合でもアンテナ出力をフィーダーによつて取出しアンテナを数米上下して見ることは非常に有効な手段である。

2.3.2 独立峰背後の電界強度

独立峰では傾斜した山陵の回折波が到来し、また山頂の真後附近では両側の山稜から廻折した電波が到来するので受信電界は非常に複雑となる。

山を一つの三角形と仮定し、座標系を第11図の如く選ぶと、伝播路 TCR で Shadow loss を決定する等価的な Knife Edge の高さは \overline{CE} でこれを H_{eff} とすれば

$$H_{eff} = \frac{H(a-x)}{\sqrt{a^2+H^2}} \quad (2-19)$$

Knife Edge と受信点 R との長さは \overline{CR} でこれを b とすると

$$b^2 = \frac{H^2(a-x)^2}{a^2+H^2} + y^2 \quad (2-20)$$

受信空中線の高さ h を考慮すると、直接波は

$$\left. \begin{aligned} H_{eff} &= \frac{a(H-h)-Hx}{\sqrt{a^2+H^2}} \\ b^2 &= \frac{\{a(H-h)-Hx\}^2}{a^2+H^2} + y^2 \end{aligned} \right\} \quad (2-21)$$

大地反射波に対しては

$$\left. \begin{aligned} H_{eff} &= \frac{a(H+h)-Hx}{\sqrt{a^2+H^2}} \\ b^2 &= \frac{\{a(H+h)-Hx\}^2}{a^2+H^2} + y^2 \end{aligned} \right\} \quad (2-22)$$

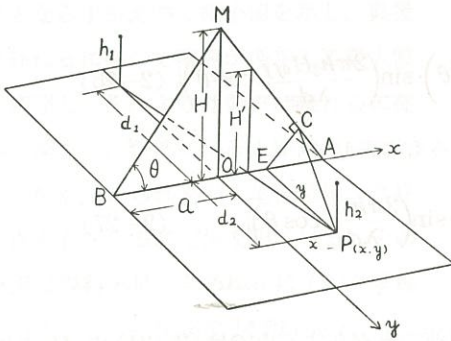
回折後直接空中線に到達する電波と大地反射波の通路差は

$y \gg H_{eff}$ とすれば

$$\Delta b \approx \frac{a(a-x)}{a^2+H^2} \cdot \frac{2Hh}{y} \quad (2-23)$$

位相に換算すると

$$\zeta \approx \frac{a(a-x)}{a^2+H^2} \cdot \frac{4\pi h H}{\lambda d_2} \quad (2-24)$$



第 11 図

山頂の真後では π を無視して

$$\zeta \approx \cos^2 \theta \cdot \frac{4\pi h H}{\lambda d_2} \quad (2-25)$$

山頂の真後では両側の山稜からの回折波が同位相で加算され合成電界は 2 倍となり (2-15) と (2-25) より

$$\left| \frac{E}{E_0} \right| = 8S \left| \sin \left(\frac{2\pi h_1 H_{eff}}{\lambda d_1} \cos^2 \theta \right) \cdot \sin \left(\frac{2\pi h_2 H_{eff}}{\lambda d_2} \cos^2 \theta \right) \right| \quad (2-26)$$

実際には $H_{eff} = H / \cos \theta$ なる水平山稜があるものとして

$$\left| \frac{E}{E_0} \right| = 8S \left| \sin \left(\frac{2\pi h_1 H}{\lambda d_1} \cos \theta \right) \cdot \sin \left(\frac{2\pi h_2 H}{\lambda d_2} \cos \theta \right) \right| \quad (2-27)$$

として計算する。

山頂の真後から外れ一方の山稜からの回折波のみ存在する点では (2-24) の H の代りに地形の断面図にあらわれる山の高さを H' とし

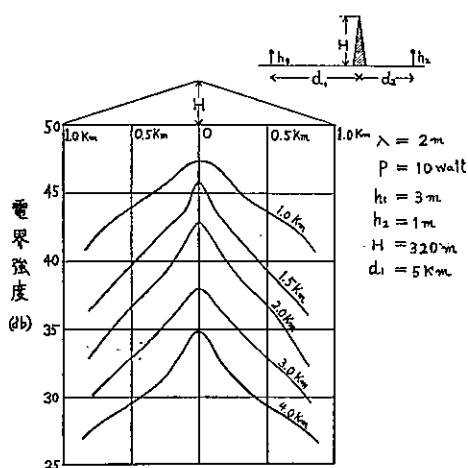
$$aH' = (a - \pi)H$$

を代入し、

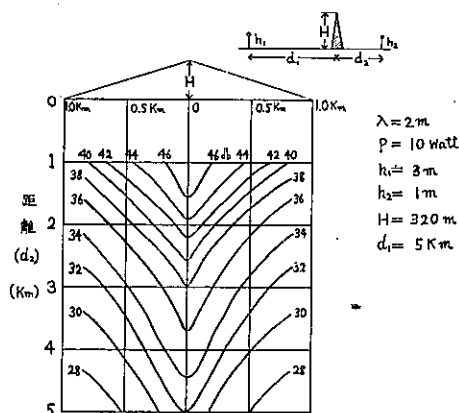
$$\left| \frac{E}{E_0} \right| = 4S \left| \sin \left(\frac{2\pi h_1 H'}{\lambda d_1} \cos^2 \theta \right) \cdot \sin \left(\frac{2\pi h_2 H'}{\lambda d_2} \cos^2 \theta \right) \right| \quad (2-28)$$

として計算する。

この結果は電界は山頂背後の電界が高く、山頂の真後を外れるに従って電界が低下し、或る距離を外れると平面大地伝播の電界以下に下り、また高電界域の巾も狭くなる傾向がある。松尾氏の著書¹⁴⁾ よりこの様子を表すグラフを第 12 図、第 13 図に示す。

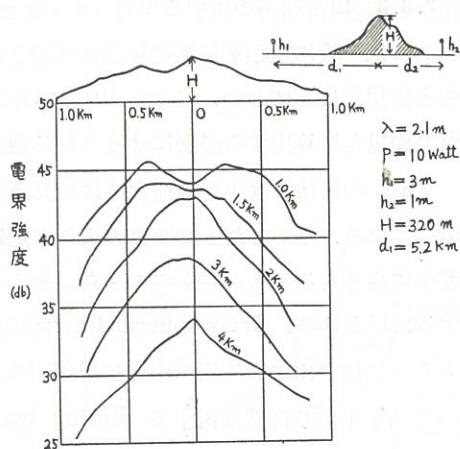


第 12 図 山岳背後における電界分布



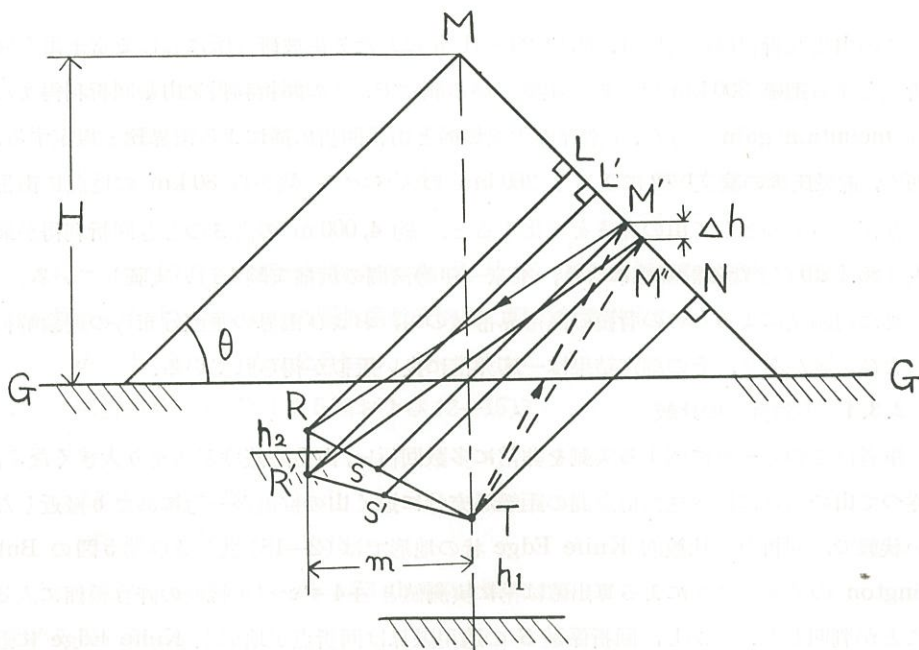
第 13 図 山岳背後における電界分布

以上の結果は筆者の実測結果によると多少の疑問がある。すなわち、実測例では、山岳遮蔽度の大きい地点——山頂に近い背後の地点——では山頂真後が最大点とならずかえつて極小値を示し、真後を外れるに従つて電界が増加して最大値に到達し、それより外側では離れるに従つて減少し、鞍部に至ると距離方向に電界変動が認められ平面大地伝播値より良い点も存在する測定例を得ている。その原因は資料不足のため現在は不明の状態である。その一例が第14図である。



第14図 山岳背後における実測電界強度

尙独立峰背後の電界について取扱う場合に重要なことは、回折点の選定と高電界領域の中を決定することである。第15図は伝播路に直角な断面図である。この図において T および R より山の稜線に垂線をたて、稜線との交点 LN を山までの距離の比で内分した点 M が最短路回折点となる。

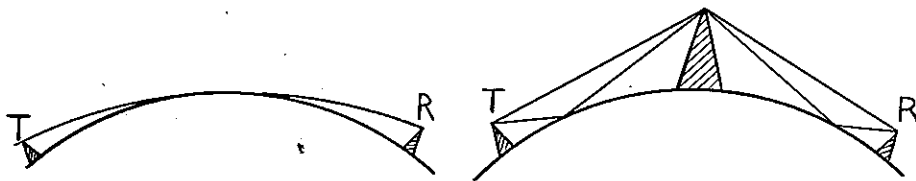


第 1 5 図

2.3.3 山岳利得の生ずる場合

これは一般に長距離伝播の場合に問題となる。従つて山岳地伝播として問題を局限すると実用性はとぼしい。しかし山地における TV 受信、或いは電力会社関係の多重通信等の場合に算出する必要にせまられる事もある。

VHF の伝播では平滑球面大地にて見透し外となると電界強度が急に弱くなり変動も激しくなる。しかし最近の実測によると遠距離になるに従い実際の電界は理論値よりも遙かに高くなることがわかつて来た。その原因の一つは大気の流れによる散乱波に原因する、いわゆる、Tropospheric Refraction または Scatter によるものと考えられ、もう一つは高山による回折現象に起因する。すなわち第 16 図のように、球面大地に沿つて $4/3$ 半径で自然回折する Sliding wave に比較して下図のように、高山山頂による一回回折にて伝播する Sky wave の方の電界が大きい場合がある。



第 16 図

この山岳回折利得の実例は、昭和 29~31 年にわたる電波研究所における富士山を回折点とする距離 300 km 以上の長距離伝播の測定で、この回折利得を山岳回折利得または mountain gain と呼び、平滑球面大地伝播と山岳回折伝播による電界比と規定する。河野、錦織氏等の論文¹⁵⁾¹⁶⁾によると 260 km のスパンで一端から 80 km の地点に山岳が存在するものとして山の高さを変化すると、約 4,000 m の高さのとき回折利得が最大 (86.5 db) となる計算値により、東京—伊勢湾間の伝播実験を行い実証している。

また同論文によるとこの背後の高電界帯域の中、および電界の垂直分布等の理論解析および実証があり、その測定結果は一応非常に良い近似が得られている。

2.3.4 実測例との比較

筆者はこのテーマに関する実測を非常に多数行い、山岳遮蔽度があまり大きくなく、従つて山の高さに比べ送受信点間の距離が充分に遠く山の位置が一方にあまり接近しない状態で、回折点が比較的 Knife Edge 状の地形では (2—15) 式および第 5 図の Bullington のノモグラフによる算出値は常に実測値と ± 4 デシベル程度の許容範囲に入ることが判明した。しかし、回折係数 S の適用限界は回折点が地形上 Knife Edge に近い場合に限られ、山岳の直後に受信点が存在する場合、回折地点が可成りの巾をもつ (例えば山頂が円頂) ときにはこの仮定は成立しなくなる。実測上から総合的にいえば

$d/H < 10$ の時には回折係数が甚だしく過少に算出される。これについては後節にて詳述する。

次に比較的好例を挙げる。

場所 志賀高原 熊の湯——池の塔山頂間

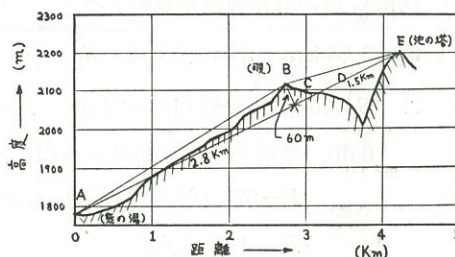
昭和 31 年 1 月 6 日 午前中 雪 気温 -8°C

本測定は第 3 次マナスル登山隊用通信機器試験の時の実測値である。この測定は充分の人員と、資材および測定器に恵まれかなり良好なデータを得ることができた。

周波数 43.85 Mc 出力 0.5 W

アンテナは伝播路断面図である第 17 図の A 点が地上高 8 m, 利得 6 db の 3 素子ビームアンテナ, B 点および E 点では高さ可変形のダブルレットアンテナ, C 点, D 点は $\lambda/4$ のホイップアンテナをそれぞれ使用した。

各地点のデータは次の通りである。



第 17 図 熊の湯—池の塔間伝播経路図

位 置	距 d_1+d_2 (km)	山 岳 遮 蔽 度 H (m)	実測電界強度 E ($\mu\text{V}/\text{m}$)
B. 視小屋	2.8	0	64
C. 第 1 尾根と第 2 尾根の窪み	$2.9+0.04$	50	0.5
D. 第 2 尾根の上	$2.9+0.15$	50	22
E. 池の塔頂上	$2.8+1.5$	60	23 (アンテナ 高 1.8m)

伝播路は第 17 図のように一回回折で A, B, C, E の四点はほぼ一直線上にある。E 点の電界強度を Bullington の回折係数を使用し図から算出すると

$$d_1 = 1.5 \text{ km}, \quad d_2 = 2.8 \text{ km}, \quad H = 60 \text{ m}$$

$$\text{回折係数} = 14 \text{ db} \text{ [第 5 図および (2-15)]}$$

したがって

$$\text{AB 間通路利得} \quad 14 \text{ db}$$

$$\text{BE 間通路利得} \quad 7 \text{ db}$$

$$\text{自由空間通路値} \quad E_0 = 63 \text{ db} \text{ [第 1 図による]}$$

求める電界強度は

$$E = 63 - (14 + 14 + 7) = 28 \text{ (db)}$$

出力 0.5 W, 送信アンテナ利得 6 db を考慮すると, 上式は

$$E=28+6-6=28(\text{db})\approx 25\text{ }\mu\text{V/m}$$

アンテナ高は (2-17) の $h_{2\text{opt}}$ の値に比し

$$h_{2\text{opt}}\approx 43\text{ m}$$

充分小さいため、算出した電界値 ($25\text{ }\mu\text{V/m}$) と実測値 ($23\text{ }\mu\text{V/m}$) は非常に良い近似をなしている

次に C 点の電界強度を算出すると

$$d_1=0.04\text{ km}, d_2=2.9\text{ km}, d_1'=\sqrt{2}d_1/1+\frac{d_1}{d_2}=0.06\text{ km}, H=50\text{ m},$$

$\therefore S=26\text{ db}$, 通路利得 $=24\text{ db}$, $E_0=67\text{ db}$ で, 出力 0.5 W , 送信アンテナ利得 6 db , 受信アンテナ利得 -6 db のときの C 点の受信電界強度 E は

$$E=67-(26+24)-12+6=13(\text{db})$$

$$\therefore E\approx 4.4\text{ }\mu\text{V/m}$$

しかし実測値は $0.5\text{ }\mu\text{V/m}$ 以下で, 遮蔽度が大きくまた一方が回折点に接近すると実測値は計算値より数十デシベル下廻ることが実証された。

筆者は実測例により d/h の比から比較的簡単な近似式を得る補正式を作り 好結果を得ている。これを山岳地伝播損失安全係数と呼んでいる。

2.4 山腹斜面反射による電界強度

山岳地超短波伝播において実用上非常に大きな影響を与えるものに山腹斜面による反射がある。このために或る地点の電波の到来方向が送信点の方向と逆向きに近い方向となることもあり, また, 回折伝播では受信不能の地点に思いがけない強電界を送り込むこともある。従つて逆にこの山腹反射を有効に取扱つて好結果を得ることも可能である。

山腹斜面反射には取扱上, 斜面上に送信または受信点がある場合と, 対斜面により反射した電波を他の地域で受信する場合とが考えられるが, まず前者の解析から始める。

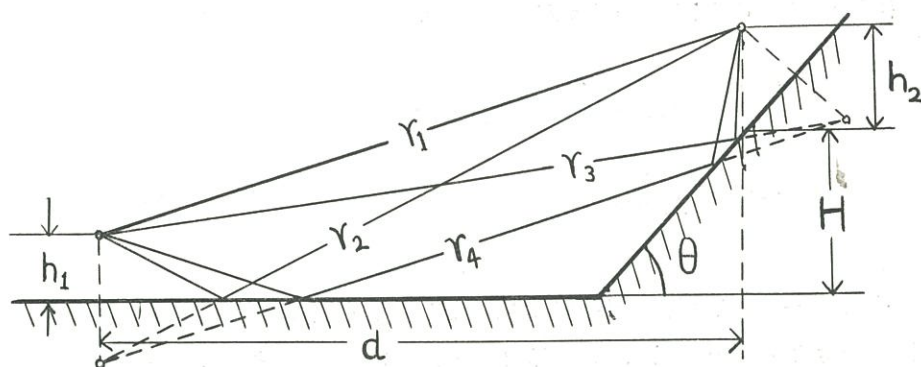
2.4.1 単斜面上の電界強度

第18図にて r_1, r_2, r_3, r_4 の四つの path が存在し斜面上の電界強度はこの四つの電界をベクトル合成して得られる。しかしこの値の算出は相当煩雑な計算を必要とし斜面の状態等も適格に定性的に表わすことは困難で実用的ではない。ここでは松尾氏による算出法¹⁷⁾を用いて計算する。

斜面上の電界強度は

$$E=2E_0\left|\sin\frac{2\pi h_1(H+h_2)}{\lambda d}+R_s\sin\frac{2\pi h_1}{\lambda d}\{H-h_2(2\cos^2\theta-1)\}e^{j\varphi}\right| \quad (2-29)$$

但し, R_s : 斜面上の反射係数 ($\theta < R_s < 1$)



第 1 8 図

$$\varphi = \pi - \frac{4\pi h_2 \cos \theta}{\lambda} \left[\sin \theta - \frac{\cos \theta}{d} \{H + h_2(1 - \cos \theta)\} \right] \quad (2-30)$$

普通山岳地では $H \gg h_2$ である場合が多いから

$$E = 2E_0 \left| \sin \frac{2\pi h_1 H}{\lambda d} + R_s \sin \frac{2\pi h_1 H}{\lambda d} e^{j \left[\pi - \frac{4\pi h_2 \cos \theta}{\lambda} (\sin \theta - \frac{\cos \theta}{d} H) \right]} \right| \quad (2-31)$$

となり $R_s = 1$ とすれば

$$E = 4E_{pl} \left| \sin \frac{2\pi h_2 \cos \theta}{\lambda} \left(\sin \theta - \frac{H}{d} \cos \theta \right) \right| \quad (2-32)$$

更に $\tan \theta \gg H/d$ ならば

$$E = 2E_{pl} \left| \sin \frac{\pi h_2 \sin 2\theta}{\lambda} \right| \quad (2-33)$$

で表わされる。

(2-32) または (2-33) から斜面上の電界強度は h_2 の変化により正弦的に変化し、その最大値および最小値は

$$E_{\max} = 2E_{pl} \quad E_{\min} = 0 \quad (2-34)$$

最大電界強度になる条件は (2-32) に対し、

$$h_{2\max} = \frac{2(n+1)\lambda}{4\cos \theta \left(\sin \theta - \frac{H}{d} \cos \theta \right)} \quad (2-35)$$

$$(n=0, 1, 2, 3, \dots)$$

(2-33) に対しては

$$h_{2\max} = \frac{(2n+1)\lambda}{2 \sin 2\theta} \quad (2-36)$$

空中線を高くして行くときの 1st E_{\max} を得る高さを $h_{2\text{opt}}$ とすると

$$h_{2\text{opt}} = \frac{\lambda}{4 \cos \theta \left(\sin \theta - \frac{H}{d} \cos \theta \right)} \quad (2-37)$$

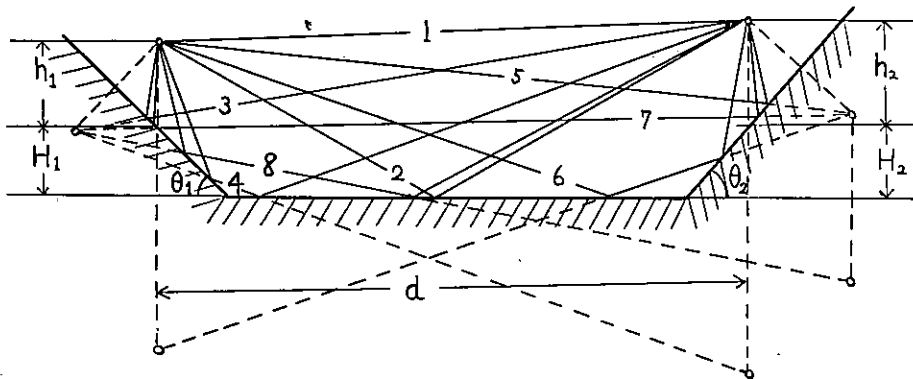
$$h_{2\text{opt}} = \frac{\lambda}{2 \sin 2\theta} \quad (2-38)$$

となる。

(2-37), (2-38) より斜面の傾斜角が急になる程低い空中線高で電界が最大となり, 無斜面のときより 6 db 高くなる。電界強度の算出は (2-32) または (2-33) を用い, また斜面の傾斜角によつて最適空中線高がある。

2.4.2 複斜面上の電界強度

本節は第 19 図のように送受信点が対斜面上にあり, 谷底が平面大地であると云う地形を取扱う。これには $r_1 \dots r_8$ の 8 個の path が存在し, このベクトルを合成して電界強度を求める。



第 19 図

$$E = 8E_0 \left| \sin \frac{2\pi H_1 H_2}{\lambda d} \sin \frac{\pi h_1 \sin 2\theta_1}{\lambda} \sin \frac{\pi h_2 \sin 2\theta_2}{\lambda} \right| \quad (2-39)$$

$$= 4E_{p1} \left| \sin \frac{\pi h_1 \sin 2\theta_1}{\lambda} \cdot \frac{\pi h_2 \sin 2\theta_2}{\lambda} \right| \quad (2-40)$$

但し, $h_1, h_2 \ll H_1, H_2, \quad H_1 H_2 \ll d$
 $\tan \theta_1 \gg H_1/d, \quad \tan \theta_2 \gg H_2/d$

(2-40) によると電界強度の最大値は

$$E_{\max} = 4E_{p1} \quad (2-41)$$

となり平面大地上の値に比し, 12 db も増大する。このためには

$$\left. \begin{aligned} h_{1\max} &= \frac{(2n+1)\lambda}{2 \sin 2\theta_1} \\ h_{2\max} &= \frac{(2n+1)\lambda}{2 \sin 2\theta_2} \end{aligned} \right\} \quad (2-42)$$

($n=0, 1, 2, 3, \dots$)

最初の電界最大値を得る空中線高は

$$\left. \begin{aligned} h_{1\text{opt}} &= \frac{\lambda}{2 \sin 2\theta_1} \\ h_{2\text{opt}} &= \frac{\lambda}{2 \sin 2\theta_2} \end{aligned} \right\} \quad (2-43)$$

となり単斜面の場合と同様である。この(2-39)(2-40)および(2-43)式はとくに谷間回折伝播の解析を行う場合に重大な関係を有する式である。

2.4.3 山腹による対斜面反射

VHF 伝播の問題においては反射係数が特に重要な意義を有する。垂直偏波の反射係数 R_v 、および水平偏波の反射係数 R_h は夫々第20図により

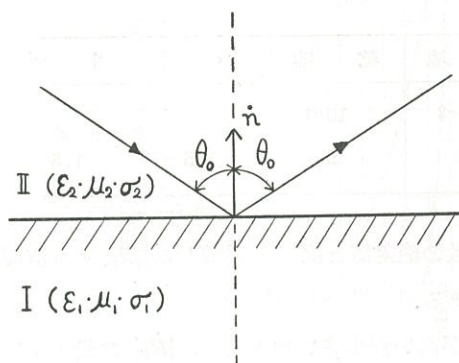
$$\dot{R}_v = \frac{\mu_2 n^2 \cos \theta_0 - \mu_1 \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_0}}{\mu_2 n^2 \cos \theta_0 + \mu_1 \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_0}} \quad (2-44)$$

$$\dot{R}_h = \frac{\mu_1 \cos \theta_0 - \mu_2 \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_0}}{\mu_2 \cos \theta_0 + \mu_1 \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_0}} \quad (2-45)$$

但し、 $n^2 = (k_1/k_2)^2$

n : 屈折率 (Snel の法則が完全に適用される)

注意 ここで言う垂直偏波は電気ベクトルの方向が入射面内にある場合、水平偏波は入射面に垂直の場合を言うもので、大地面に対して言うものとは異っている。例えば、



第 20 図

特に斜面が垂直な岩壁のような急斜面のときには以上の呼称は反対の場合をさすことになる。

いま空気 ($\sigma=0, \epsilon=1, \mu=1$) を媒質 2, 大地を媒質 1 と考えると
 空気に対しては $\sigma_2=0, \epsilon_2=\mu_2=1$ なる故

$$k_2^2 = \frac{\omega^2}{C^2}$$

大地に対しては、岩壁が磁鉄鉱でもない限り、 $\mu_1=1$ とおけるので

$$k_1^2 = \frac{\epsilon_1 \omega^2 + j 4 \pi \sigma_1 \omega}{C^2}$$

$$\therefore n^2 = \left(\frac{k_1}{k_2} \right) = \epsilon_1 + j \frac{4 \pi \sigma_1}{\omega} \quad (2-46)$$

但し、 $\omega = 2\pi f$

従つて (2-44), (2-45) 式に (2-46) を代入すれば、大地の ϵ_1 , σ_1 と ω が与えられると反射係数 R_v , R_h を求め得る。

垂直偏波では Brewster Angle θ_B では $R_v=0$ に近くなる現象がある。

$$\tan \theta_B = n \quad (2-47)$$

大地は完全導体ではないため、 $R_v=0$ にはならないが反射係数が最小値を示す。

$$\text{次に} \quad \sin \theta_C = n \quad (2-48)$$

とおくと (2-44) (2-45) から

$$90^\circ > \theta > \theta_C$$

の範囲の入射角に対し

$$|\dot{R}_v| = |\dot{R}_h| = 1$$

となり、 θ_C を全反射の Critical Angle と云う。

一般に R_v , R_h は複素数のため絶対値と位相を計算すると

$$\left. \begin{aligned} \dot{R}_v &= |R_v| e^{j\varphi_v} \\ \dot{R}_h &= |R_h| e^{j\varphi_h} \end{aligned} \right\} \quad (2-49)$$

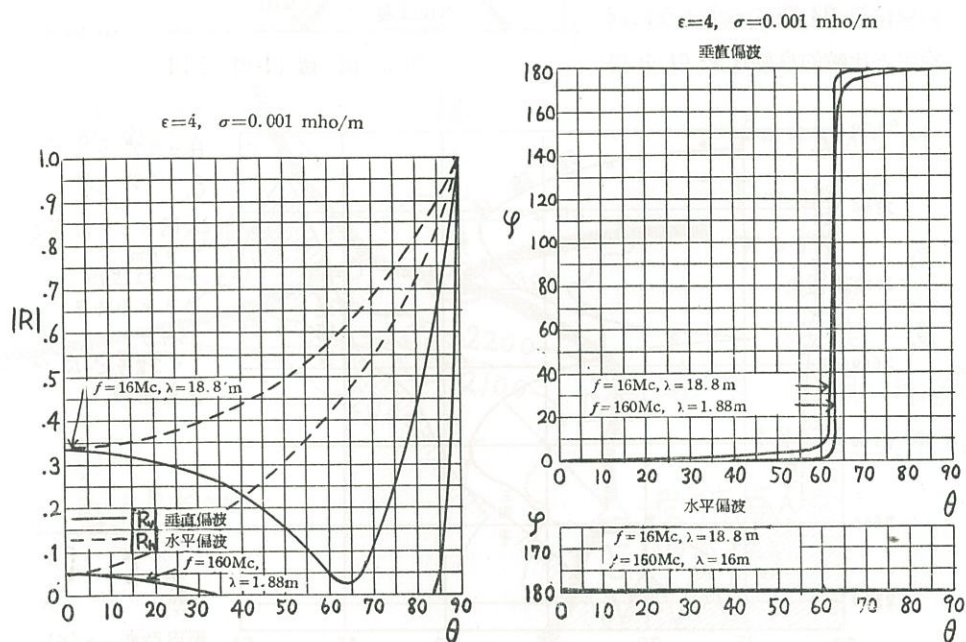
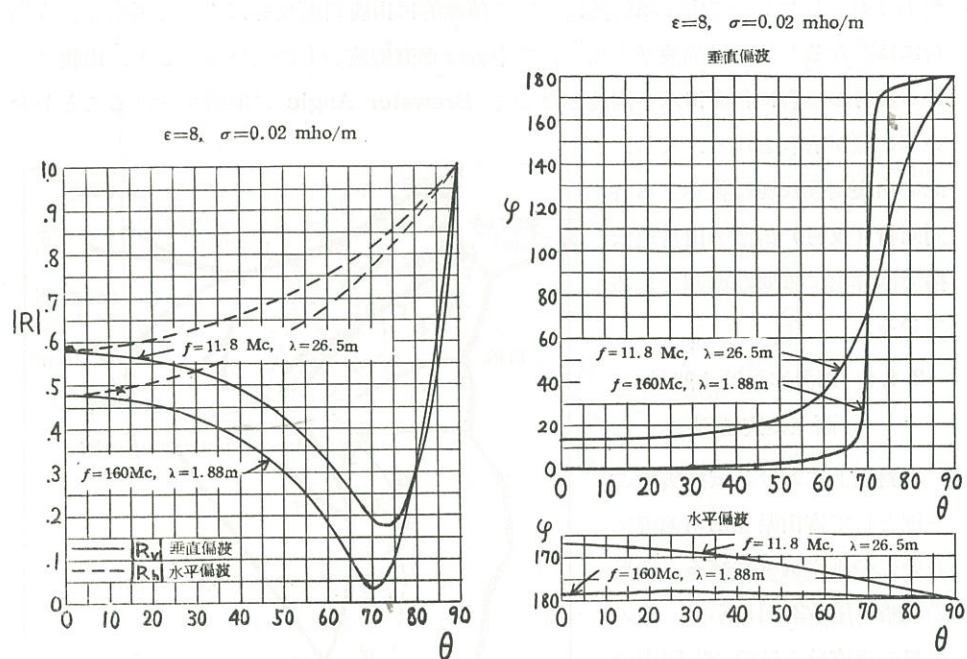
にて、 $|R_v|$, $|R_h|$ と φ_v , φ_h を算出せねばならない。いま種々なる大地の ϵ , σ の値を示すと次表となる。

	海 水	淡 水	湿 地	乾 地	氷 面	雪 面
$\sigma (\Omega/m)$	5	1	10^{-2}	10^{-4}		
ϵ	80	78	15	5	3.5	1.5

上表により湿土および乾地における反射係数の絶対値と位相を計算した結果を垂直偏波、水平偏波について示した図が第 21 図である。

この結果から、Brewster Angle は周波数が高い程小さい角となり、 $|\dot{R}_v|$ の最小値は σ_1 が小さい値で、また波長が短い程少なくなる。垂直偏波では Brewster 角の附近で

第 2 1 図



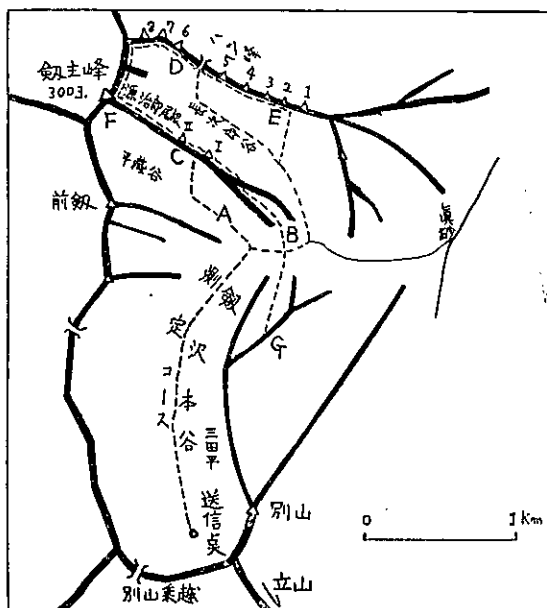
位相が急激な変化を示しており、全反射の Critical Angle は普通の大地では無影響な程小さい。したがって山岳地伝播において積極的に山腹斜面反射によつて通信を行う場合には、なるべく高い周波数を用い、空中線は垂直偏波のものを使用すると、山腹における反射の場合に斜面に水平偏波となつて Brewster Angle の影響を受けることが少い等の点が有利となる。なお、

此の山腹斜面反射は後述する谷間回折（反射）伝播等山岳地伝播では非常に重要な役割を果している。

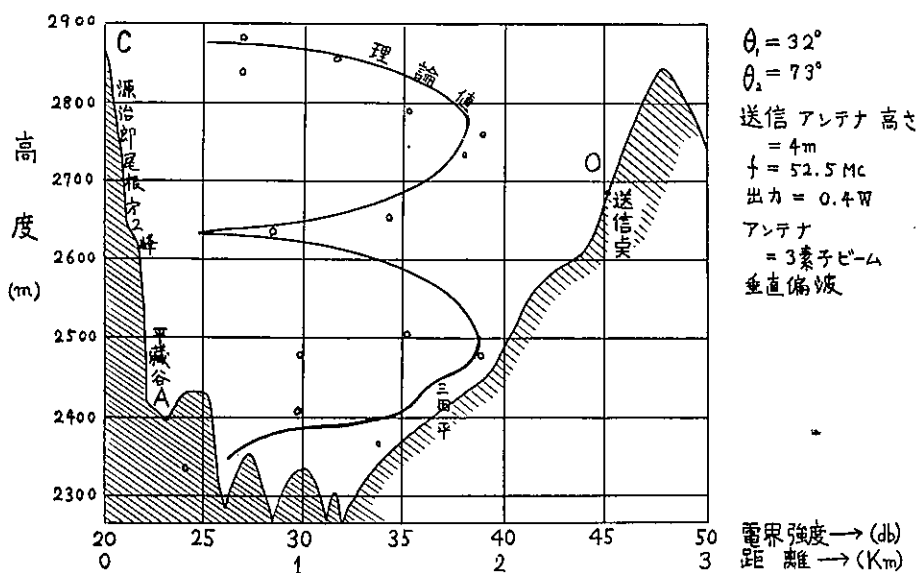
2.4.4 剣沢における凹斜

面上の実測例

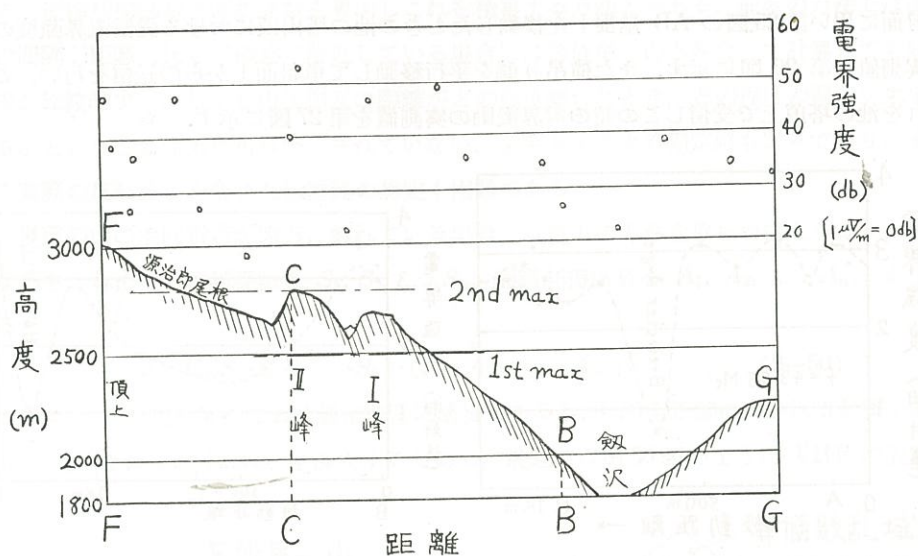
単斜面上における伝播実験の一例として富山県立山町剣沢における測定例を挙げる。地形の概略は第 22 図に示す。その電界の垂直分布は第 22 図中の AC 間の分布を測定した。その結果は第 23 図に示すように理論値と比較的良好な近似を得



第 22 図 剣沢概要図



第 23 図

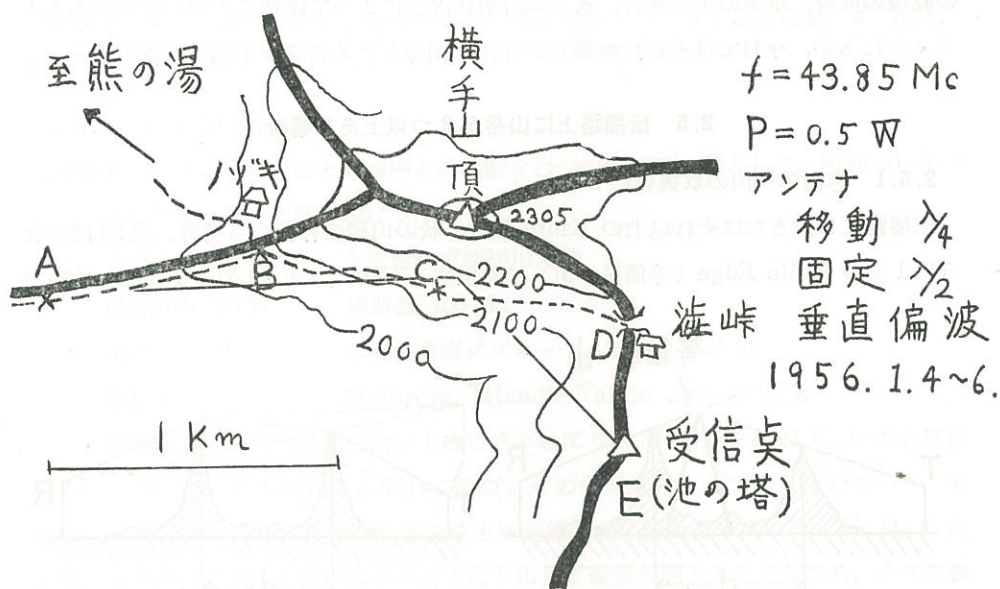


第 2 4 図

た。また電界の水平分布は第 22 図の G, B, C, F のコースで第 24 図のごとく谷の中央で良好である結果を得た。同様な結果を複斜面上においても得ており、赤城山々腹——榛名山々腹間、立山——後立山山脈間のような単純な地形では良好な近似を得ている。

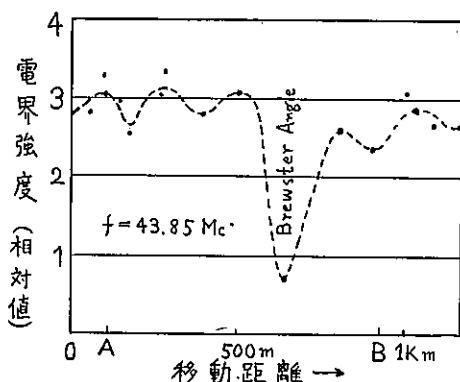
2.4.5 横手山における斜面反射の実測例

山腹斜面を反射面に利用した伝播実験例として、志賀高原の横手山横吊り側斜面を反

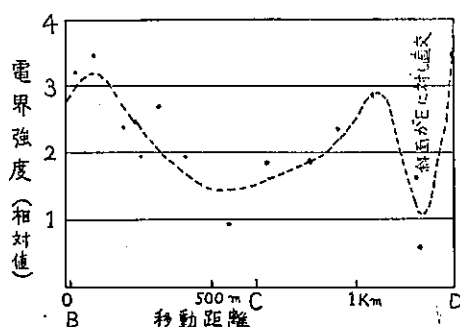


第 25 図 横手山の伝播測定地形概要

射面に用い第 25 図の AB 尾根上を移動したときの池の塔山頂における受信電界強度の実測値を第 26 図に示す。また横吊り側を平行移動して単斜面上からの送信を行い、これを池の塔頂上で受信しこの時の電界変動の実測値を第 27 図に示す。



第 26 図 横手山における山腹反射測定結果



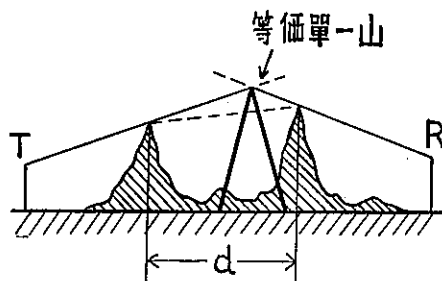
第 27 図 横手山における山腹反射作用の測定

この結果から水平偏波で山腹反射を行う場合には Brewster Angle の影響が生じ、垂直アンテナの場合に比較的安定な実測電界を得ている。また斜面上の送信でも斜面上の位置により受信電界の変動があり、実用上 (2-37), (2-38) によるアンテナ高さはばかりでなく水平方向の位置についても考慮の必要のあることが実証されている。反射において反射係数を一般に +1 としているが、反射面とくに反射点附近の大地または壁面の乾湿の度合、草木の生え具合、氷雪の附着状況等によつて係数に多少の変化があると考えられるが、今日ではその比較測定が非常に困難なために全々不明の現況である。

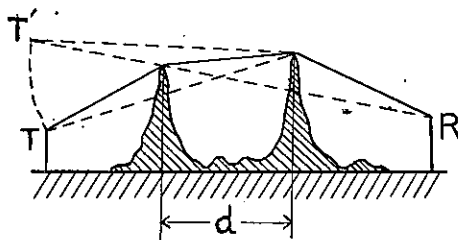
2.5 伝播路上に山岳が 2 つ以上ある場合

2.5.1 等価単一山の取扱について

伝播路に 2 個またはそれ以上の Knife Edge 状の山稜の存在する場合、第 28 図のように 1 個の Knife Edge (等価単一山) に置換する方法と、第 29 図のように各通路ご



第 28 図



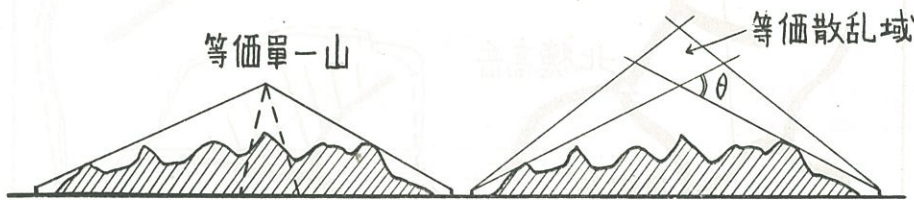
第 29 図

とに通路利得係数と回折係数を算出しこれを積算する方法とがある。前者の方法では山の間隔が距離に比して極めて接近している場合には等価単一山とみなして計算しても偏差が比較的少い。しかし山岳相互の距離がどの程度離れたとき、どの程度の偏差が生ずるかということは未だ明らかにされていない。場合々々による測定値も区々であり、その実際の反射波等を含めた伝播路の想定も困難である。

多重の山の主回折点が遠方に離れている場合には後者の方法を取らねばならない。すなわち、各山岳の回折係数を S_1, S_2, \dots, S_n , 通路利得係数を A_1, A_2, \dots, A_{n+1} とすると

$$E = E_0(S_1 \cdot S_2 \cdot \dots \cdot S_n) \cdot (A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_{n+1}) \quad (2-50)$$

となる。この式を解くことは通常非常に繁雑であるし、¹⁷⁾ 図も正確に書かれる必要があり、色々な誤差の factor も混入するために、最近では第 30 図のように VHF の散乱



第 30 図

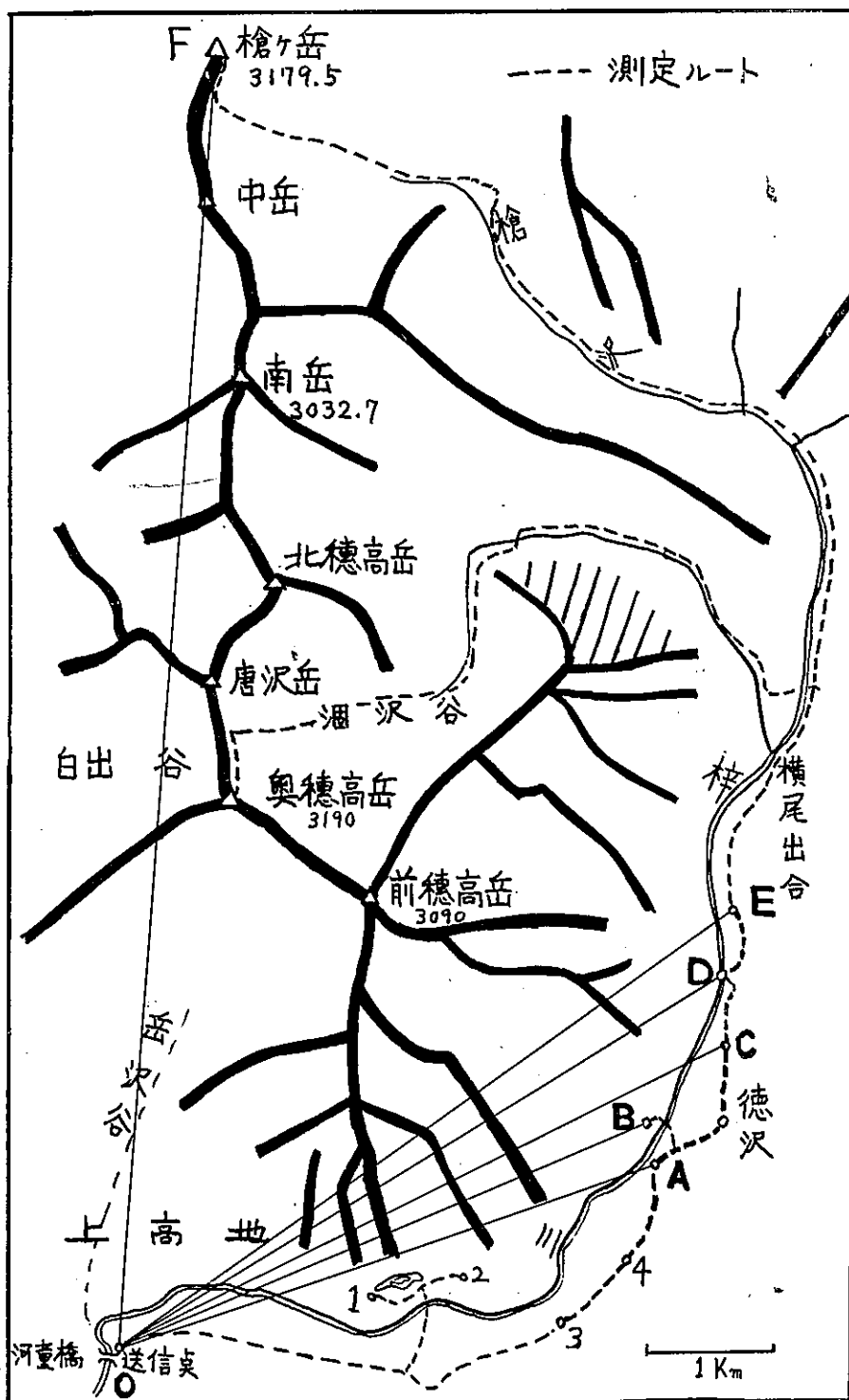
伝播の理論を応用して、等価単一山の回折を散乱現象として取扱うことにより、比較の実測値に一致した結果を得られることが報告されている。¹⁸⁾ 従つてこの問題の解析も今後の重要なテーマの一つとして挙げられる。 $(E_s = E_0 e^{-r\sqrt{d}})$ r : 伝播定数, d : 距離, 山腹での $\alpha \simeq 2$.¹⁹⁾

2.5.2 実測例との比較

等価単一山による理論値と実測例との比較を行つた測定の一例として、昭和 31 年 8 月の上高地における実測例を挙げる。

送信アンテナ位置	上高地河童橋梓川左岸
送信出力 10 W	周波数 150 Mc
送信アンテナ	半波長垂直ダブレット, 地上高 3.5 m
移動機	Motorora. Handie-Talkie 出力 0.25 W

この移動機を携帯して梓川に沿ひ上流にさかのぼり第 31 図中の A, B, C, D の各受信点をへて E より F なる槍ヶ岳頂上に至つてその受信電界を測定したものであり、第 32 図の各図は夫々の伝播径路と各理論値と実測値との比較を行つている。C, D, E 点の偏差はスパンに対する山の高さが高くなり山岳遮蔽度が過大となつたため、大きな誤差を生じたものと考えられる。しかし谷間ではその他反対側の山腹反射、谷間伝播の影

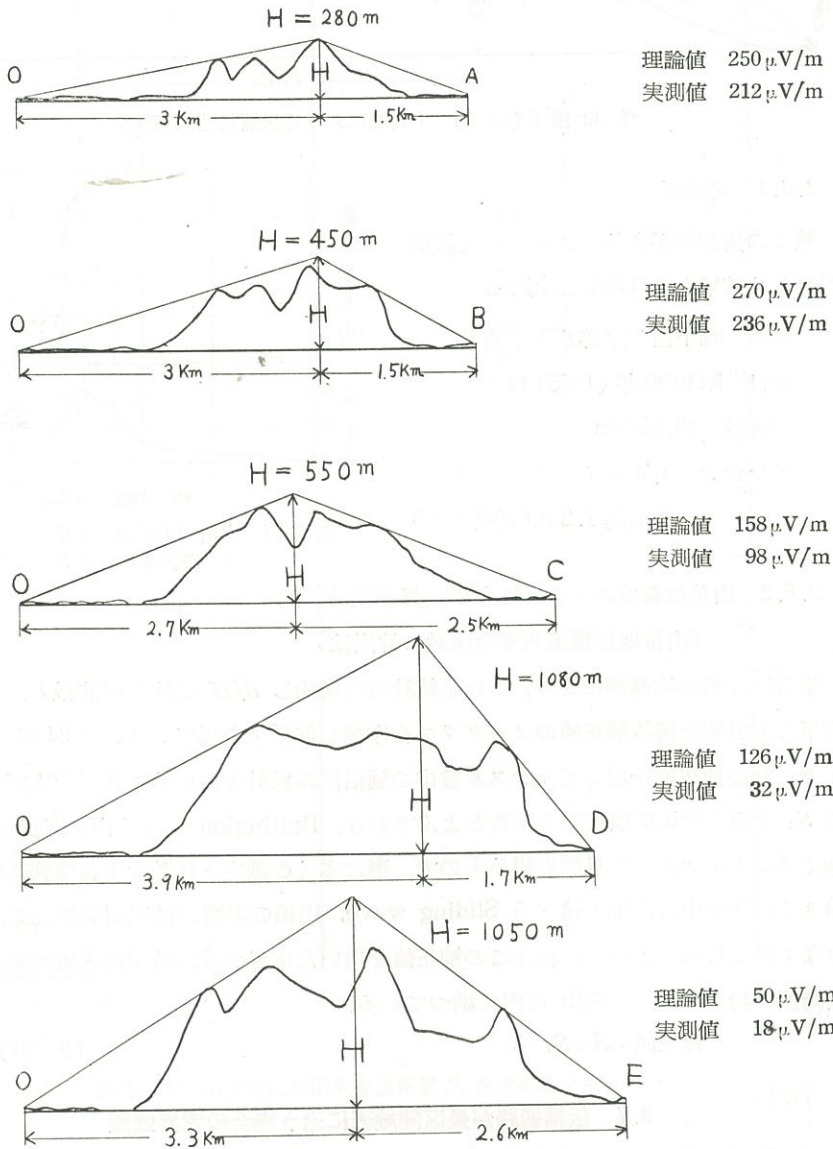


第 31 図 上高地における伝播試験概念図

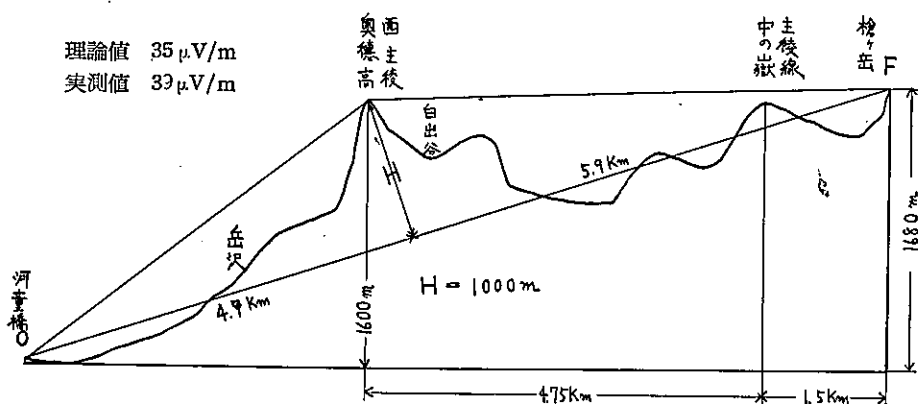
響も考えねばならないが、この測定では一応これらの影響が小さい地点を選んだつもりである。

2.6 山岳遮蔽度の大きいときの電界強度

前節の実測例によつても明らかなごとく、スパンに比し山の高さが充分高いとき、また送・受信点の一方が山の直背後にあるときの実測値は、今まで求めた回折係数の式による理論値よりもかなり低い値となる。



第 32 図 (その 1) 上高地における伝播特性測定結果



第 32 図 (その 2) 上高地における伝播特性測定結果

2.6.1 実測例

幾多の実測例があるが、ここに比較的明快なる結果を第 33 図に示す。

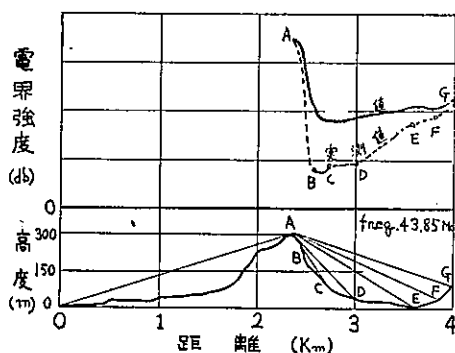
場所 都下西多摩郡八王子市外

期日 昭和 30 年 (1955) 11 月

周波数 43.85 Mc

アンテナ $\lambda/4$ ホイップ (送受とも)

地上高 1.2 m (送受とも)



第 33 図 山岳回折伝播の遮蔽の大きいときの理論値と実測地との比較例

2.6.2 山岳遮蔽度の大きいときの電界強度補正式

(山岳地伝播損失安全係数の算出法)

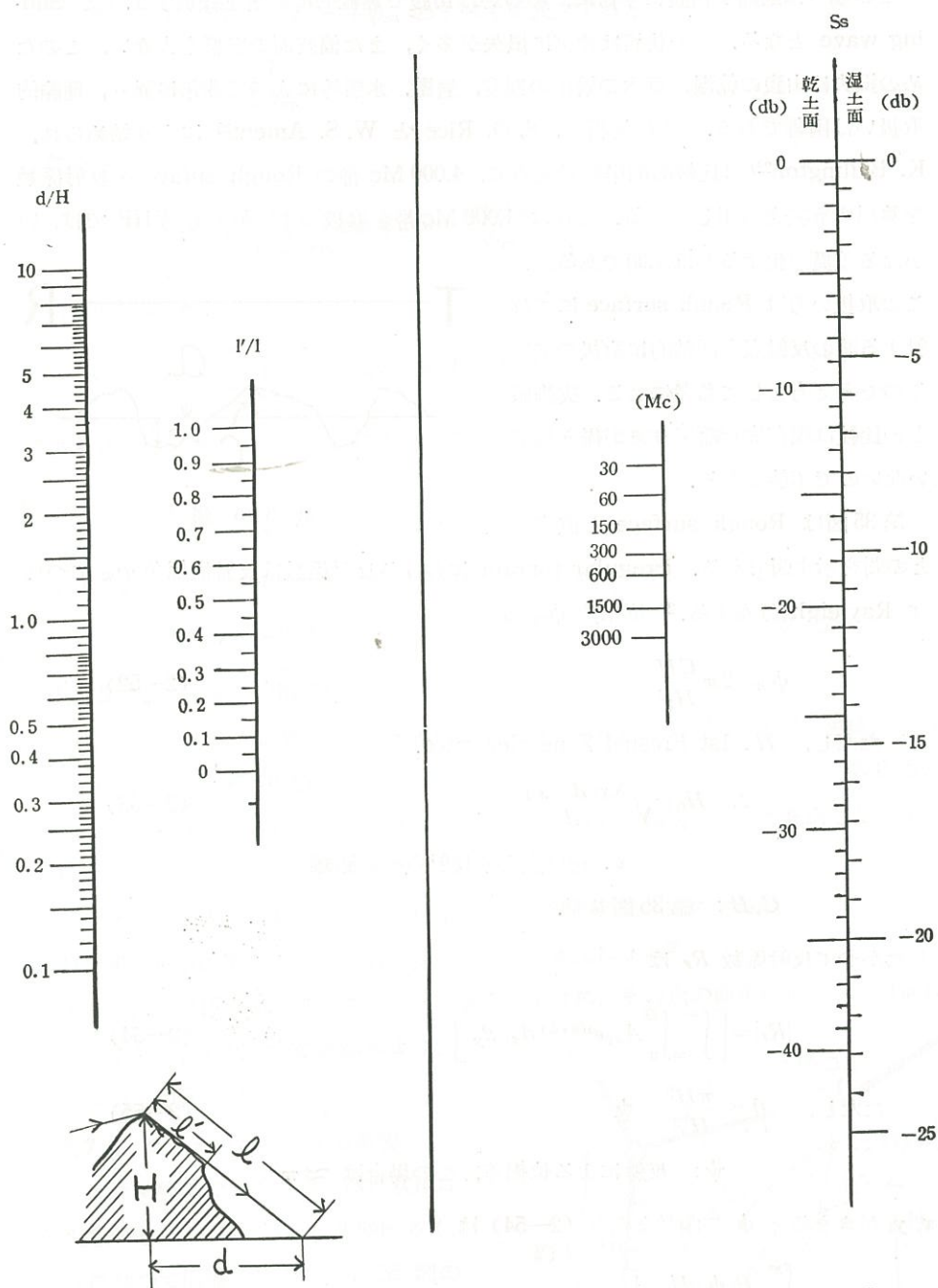
筆者は多数の実測例により、これを統計的に集約し d/H の比と周波数とから比較的簡単な近似値を得る補正値のノモグラフを作成し好結果を得ている。第 34 図がそれで、すでに此の補正値を用いてマナスル登山の通信回路設計を行いその効果を実証した。この S_2 を山岳地伝播損失安全係数とよんでおり、Bullington による山岳回折利得 S に加えることにより、電界値を得るもので、更に多くの測定と経験を重ねて修正を施し、追々この係数中に次節で述べる Sliding wave, 円頂の影響の補正項も加えて、一層完全なものにしたいと思う。現在この補正値を用いた電界強度の算出値と実測値の偏差は実測例の約 70% が ± 6 db 以内に納っている。

$$\text{修正値} = S + S_2$$

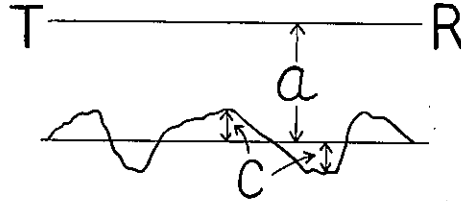
(2-51)

2.7 伝播通路が長区間地表に沿う場合の電界強度

2.7.1 山腹に接しての伝播

第 34 図 山岳地伝播損失安全係数 S_s を求めるノモグラフ

この場合は通路が山腹に平行に、あるいは山腹で連続的に回折を繰返すような Sliding wave となる。この状態は非常に損失が多く、また偏波面の影響も大きい。このための損失は山腹の乾湿、草木の繁茂の程度、岩壁、氷雪等によつて非常に異り、理論的取扱いは困難である。この解析は、S. O. Rice と W. S. Ament²³⁾ により始められ、K. Bullington²²⁾ は比較的簡単な考え方で、4,000 Mc 帯の Rough surface の反射係数を算出する式を導出している。これは 4,000 Mc 帯を取扱っているので VHF では、いかなる差異を生ずるかは不明であるが、この取扱いは Rough surface にて反射する波の反射点を面積的に取扱っているので考え方として参考になる。実測値との比較は現在完全なデータが得られていないので不能である。



第 35 図

第 35 図は Rough surface と直接波との間を示す図である。irregular terrain における反射係数は反射位相角 ϕ_m につれて Rayleigh 分布する。²³⁾ 位相角 ϕ_m は

$$\phi_m = 2\pi \frac{CH}{H_0^2} \quad (2-52)$$

ただし、 H : 1st Fresnel Zone clearance.

$$\therefore H_0 = \sqrt{\frac{\lambda x(d-x)}{d}} \quad (2-53)$$

x : 送信点より反射点への距離

C, H : 第 35 図参照.

したがつて反射係数 R_r は

$$|R_r| = \left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_0^D A_{xy} e^{i(\theta + \phi)} dx, dy \right] \quad (2-54)$$

$$\text{ただし、} \quad \theta = \frac{\pi H^2}{H_0^2} + \psi \quad (2-55)$$

ψ : 反射による位相差、この場合は $\approx \pi$

x, y がきまると ϕ の函数となり (2-54) は

$$\int_{-\infty}^{\infty} P(\phi) d\phi = 1$$

とおけるので R_r は

$$|R_r| = \int_{-\infty}^{\infty} P(\phi) \cos \phi d\phi \quad (2-56)$$

で表わされ、 ϕ の値が $-\phi_m \sim +\phi_m$ のすべてに成立すると、

$$P(\phi) = \frac{1}{2\phi_m}$$

したがって

$$R_r = \frac{2}{2\phi_m} \int_{-\phi_m}^{\phi_m} \cos \phi d\phi = \frac{\sin \phi_m}{\phi_m} \quad (2-57)$$

またこの結果

$$R_r = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos(\phi_m \sin \nu) d\nu = J_0(\phi_m) \quad (2-58)$$

で表わされる。これをとくために大地の導電率 σ を加味して $P(\phi)$ を

$$P(\phi) = \frac{e^{-\phi^2/2\sigma}}{\sqrt{2\pi\sigma}}$$

とおくと、求める反射係数 R_r は近似的に、次式によつて表わされる。

$$R_r = e^{-(\phi_m^2/2\sigma)} \quad (2-59)$$

2.7.2 山岳稜線が円頂の場合

回折利得 S の適用限界は Knife Edge である場合に限られ、回折地点が可成りの巾をもつ（例えば山頂が円頂）ときにはこの仮定が成立しなくなる。しかし、一般山岳の場合は円頂が普通であり、受信電界強度は稜線を Knife Edge として算出した値より一般に低い値となる。この補正には

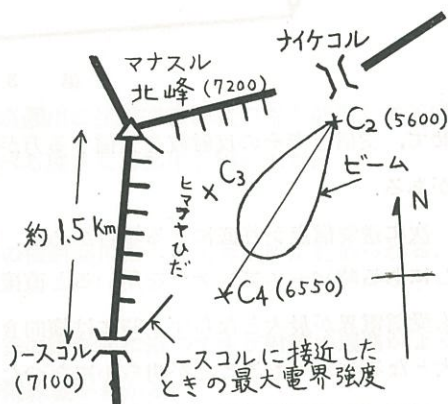
I. 回折点を或る曲率半径をもつ曲面とする方法——松尾氏による¹⁹⁾

II. 回折波が回折点で吸収散乱を受ける——鈴木氏による²⁰⁾

とする方法の二種が発表されているが、実際の場合に、その点の曲率の決定が不可能に近く、また後者も回折点の状態により左右されるため実用的でない。

2.7.3 ヒマラヤひだによる影響

ヒマラヤ独特の現象に氷がひだ状になる現象があり、一般に急峻な北壁に多く、これに沿つて伝播する電波は第 36 図のように“くしの歯状回折伝播”に似て連続した回折点を有するようになり、特にひだに垂直な偏波の電波では最大電界点がひだの側に曲がること、マナスル北



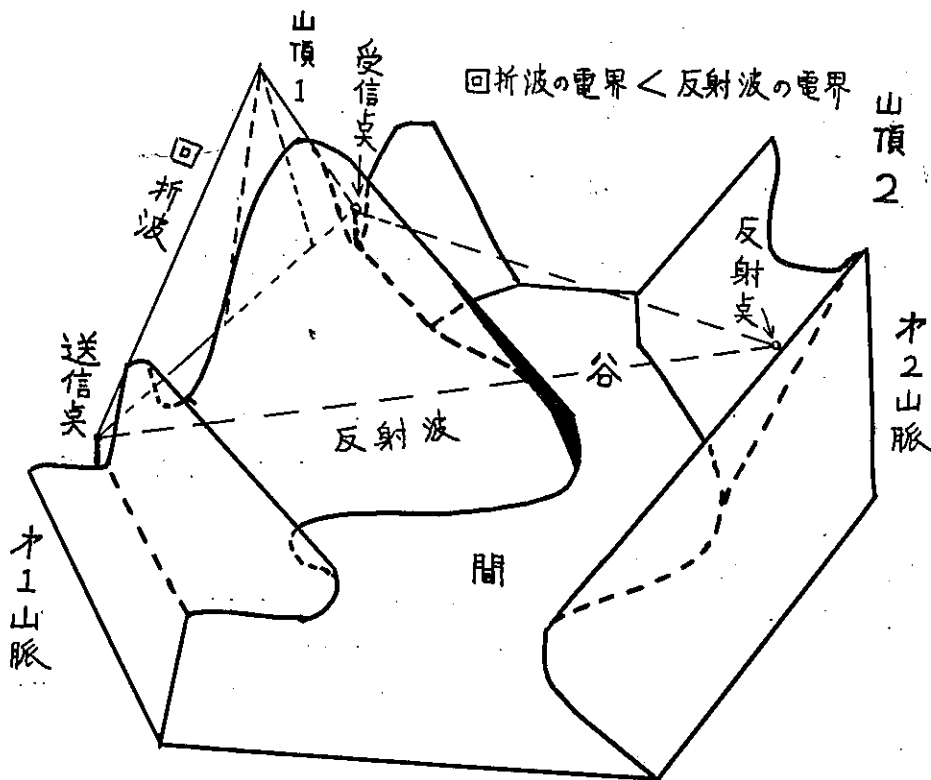
第 36 図

峰にて実証された。

2.8 峡谷中の特殊伝播（谷間回折）

2.8.1 谷間回折の理論

二つの平行した長い山脈があり、一方の山脈中の鞍部から鞍部へ、または山腹の一点から他の山腹の一点へ通信が必要となつた場合に第 37 図のように送信点と受信点が見透しでないとき、等価単一山による回折損に比較して対岸の山腹の適当な地点で反射さ

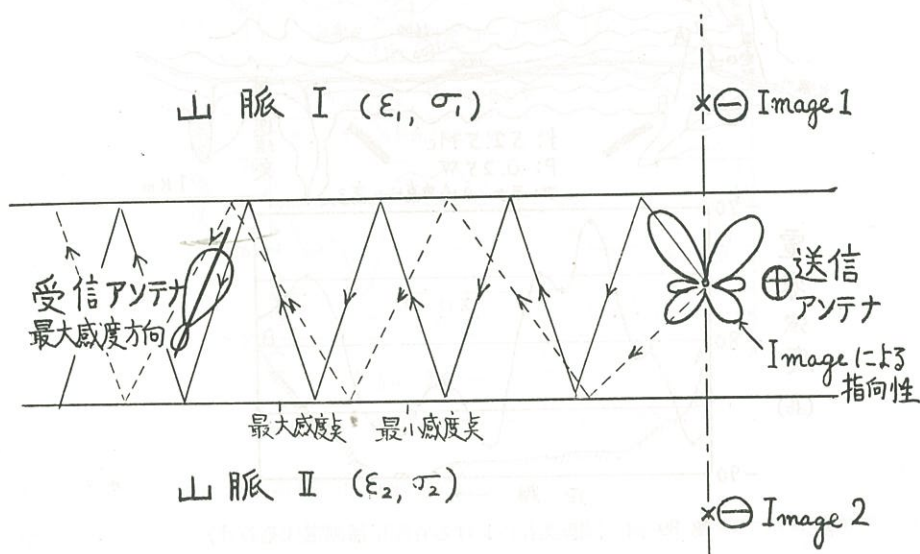


第 37 図

せて、受信点でその反射波を受信する方がはるかに大きな受信電界強度が得られる場合がある。

次に送受信点が谷底にある場合がある。筆者の実測によると、双方のアンテナが見透しにある時ビームアンテナを用いると直接互いに最大輻射方向に向い合せたとき必ずしも受信電界が最大とならず、時には横向きまたは後方に Main lobe を向けたときに最大となることもあることが明らかになった。また谷の軸方向および横断方向に移動すると電界が周期的に変動することも認められた。

この原因は谷間を形成する兩岸の岸壁面に交互に反射を繰返し時には回折を繰返し進行するために生ずると考えられる。また岸壁面を完全導体と仮定するとアンテナの鏡像が生じ、その間隔と電流位相差により、アンテナの最大輻射方向が谷の軸から外れると考えることによつて説明できよう。したがつて第 38 図のように、谷を種々の高次モードをのせた一つの壁面処理の極めて悪い導波管として解析することができる。



第 38 図

この特性を逆用すれば屈曲した谷、または本谷から支谷へのように見越し外の峡谷中の通信も可能性が考えられる。またこれを有効ならしめるにはビームアンテナを使用することが必要である。

筆者は現在最も解析のおくれているこの谷間伝播特性の研究を主なテーマとして種々の地形で測定を行いつつある。

2.8.2 高瀬川における実測値

昭和 29 年、昭和 31 年 8 月、北アルプス高瀬川の比較的直線状の谷を使用して谷間伝播特性の測定を行つた。その結果以下に述べる種々なる結果を得られた。

1. 谷間反射による伝播 (その 1)

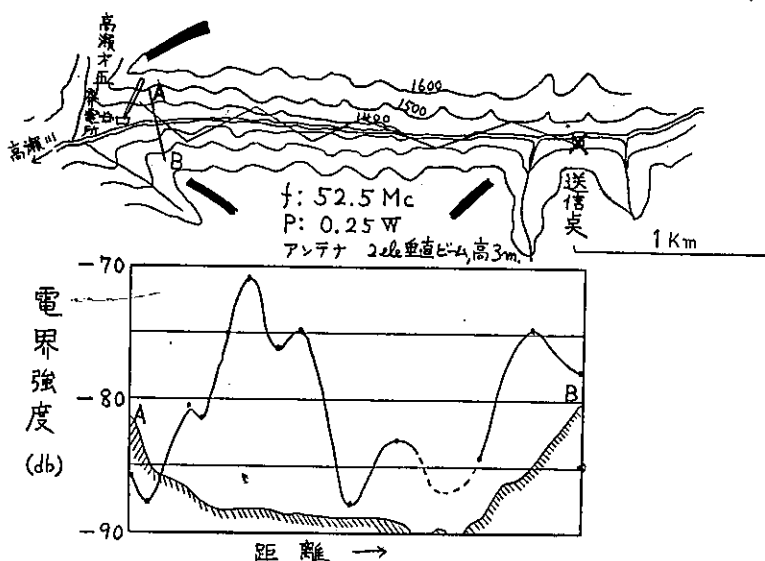
第 39 図のように第 1 次、第 2 次と谷の横断面に沿つて電界変動が認められる。

2. 谷間反射による伝播 (その 2)

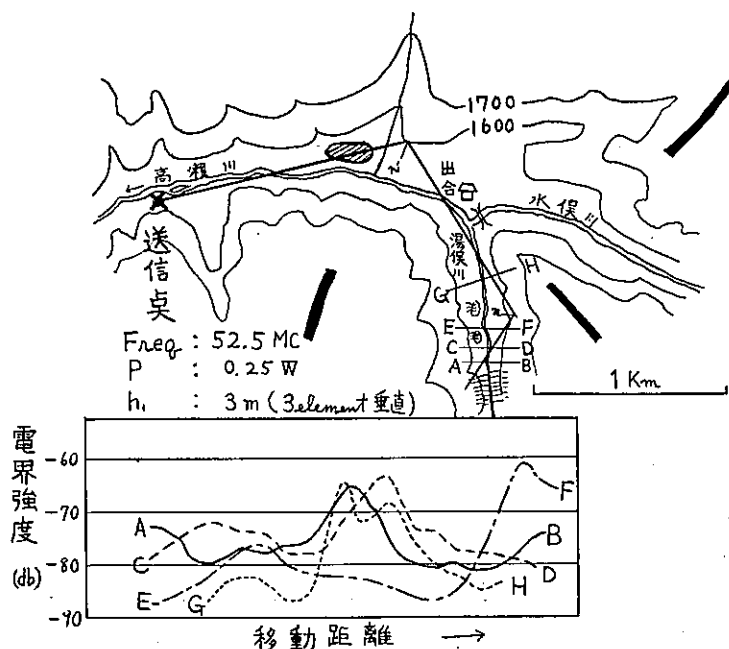
第 40 図のように 2 回反射の例を示す。谷の縦断面に沿つて主反射波の通路がよくわかると共に左岸に近く回折波による強電界域がわかる。

3. 谷間回折による伝播

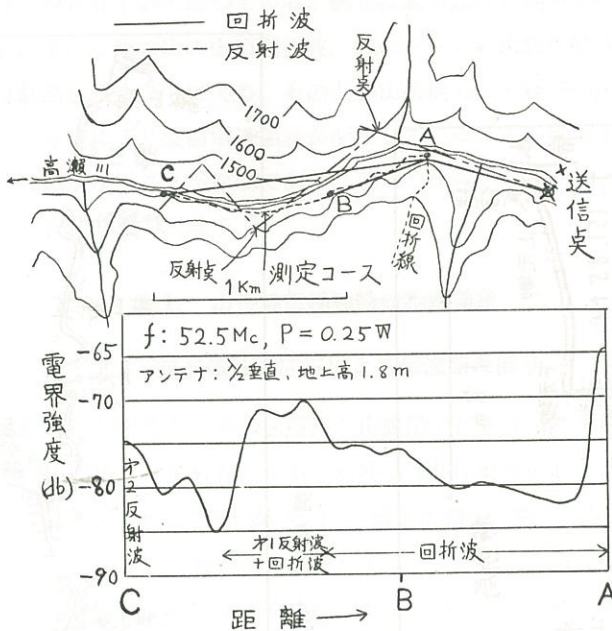
第 41 図のような地形で A—B—C の経路を移動してその電界を測定するとその電界は、回折波の領域と反射波の領域とが連続測定できる。図 A より B までは回折波のみ、B より D は回折波と反射波の合成域で通路差による位相差のため電界強度が大きく変動する。C 点附近では第 2 反射波が見える。



第 39 図 高瀬溪谷における谷間伝播測定 (その 1)



第 40 図 高瀬溪谷における谷間伝播測定 (その 2)



第 41 図 高瀬溪谷における谷間回折測定

2.8.3 奥多摩溪谷における谷間伝播特性の測定

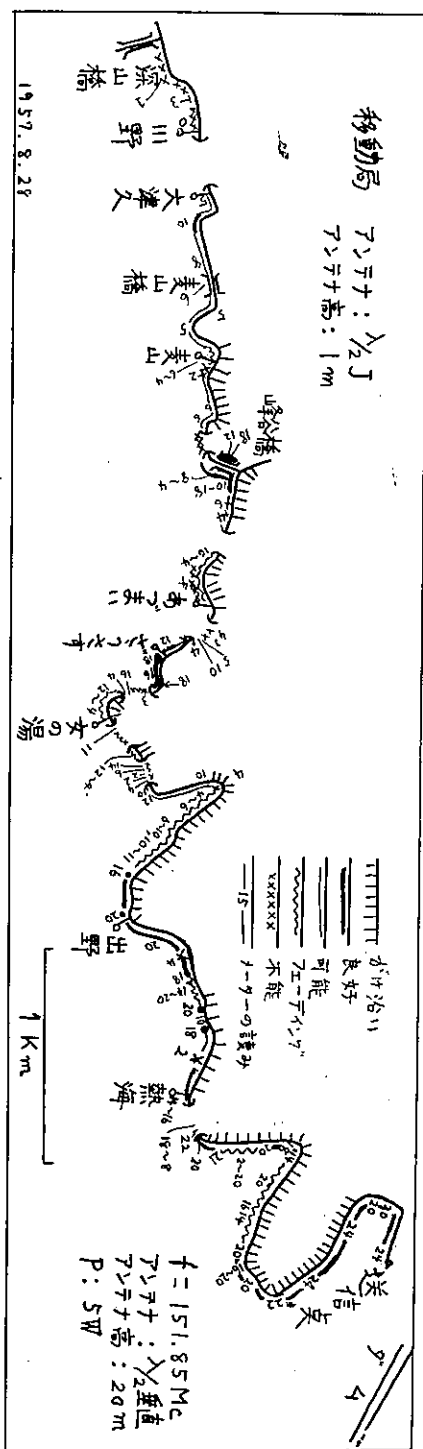
昭和 32 年 8 月 28 日に奥多摩小河内ダムより上流に向い、自動車に電界強度測定器をのせて連続測定を行い、第 42 図に示すような実測値を得た結果、連続測定によつてのみ発見される種々の新しい現象を知ることができた。図中、A、B 点は比較的距離の近い点で急激に電界が減少する点であり、また壁面に沿つた移動により大略 $\lambda/2$ の間隔で電界変動があることが認められ、また C、D 点では周囲に比較して強電界が得られることが判明した。現在これらの結果を検討中で、今後更に研究の必要がある。またトンネル内の電界が入口より 1~2 波長内部に鋭い極大点を有していることも興味ある問題である。

2.8.4 秋川溪谷における谷間伝播特性の測定

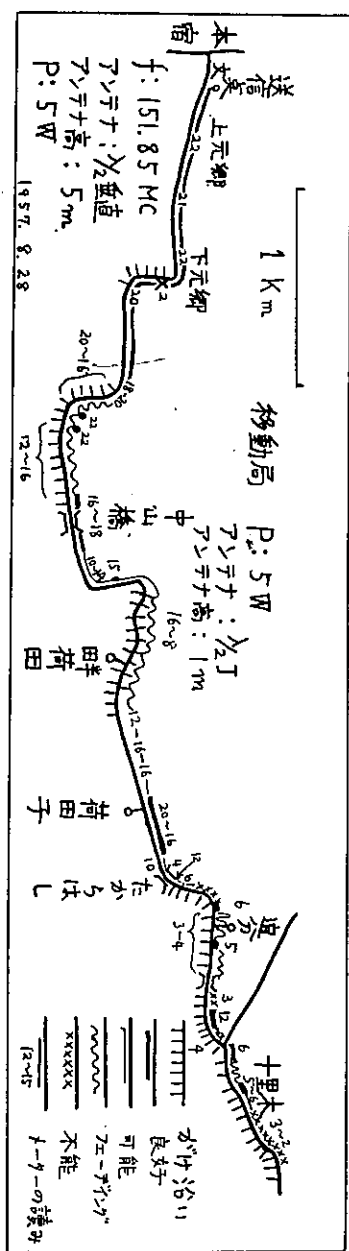
昭和 32 年 8 月 28 日午後、更に秋川谷本宿の檜原小学校に送信アンテナを設備し、秋川沿いに溪谷中を移動しつつ、自動車による電界強度の連続測定を行い、前項と同様の興味ある測定結果を得て現在検討中である。その結果は第 43 図に示す。この溪谷は比較的広げており地形も前項より単純であるためその解析は幾分楽と考えられる。

2.9 地形による多重経路伝播の影響

一般に実際の山岳地形は今まで述べたような単純な地形ではなく、色々の地形が複雑に組み合わさつて形成されており、そこにおける VHF の伝播はその微地形にまで影響



第42図 奥多摩における伝播測定結果



第43図 秋川谷伝播測定結果

されてものすごく複雑なものとなつている。例えば或る点から輻射された VHF 電波は谷間回折、反射、または他の山の山頂回折波、他のコースの山腹反射等が互に作用し合つて、所謂多重経路伝播をなしてくる。そのため山岳地では各経路の電波の干渉によりアンテナ高さ、位置等により受信電界強度が変化しているので、受信する場合には可能な範囲で電界最強点を探すことが有効であり、以上の経験から指向性アンテナの使用と垂直偏波の使用が有利であると思う。

III. 山岳地伝播独特の特殊現象

3.1 垂直偏波の回折による偏波面の偏り

垂直偏波で発射された電波が、その伝播路が山腹沿いに進み 1st Fresnel zone が地表に接触し、また小回折点が多数存在するいわゆる Sliding wave では次第に波面が進行方向に傾斜して来る。これは昭和 25 年 8 月槍ヶ岳肩——槍沢小屋上流 500 米附近の通信の際発見した。すなわち槍ヶ岳局は垂直ホイップアンテナを電波の到来方向に傾けるにつれて感度が増大し、ある角度（約 45° ～ 50° ）で極大値を得た（周波数 52.5 Mc, 出力 0.7W, アンテナ：手持ホイップ）。この現象はその後、他の場所および時にしばしば経験した。

3.2 不均一大気中の伝播

超短波帯以上の不均一大気中の伝播解析には、現在乱流論を主体とした取扱いがなされている。しかし、これに関する測定は現在の我々の研究設備、研究期間では長期連続測定は不可能のため、本論文では、一応以下五つの事例を得たのでその結果を御報告する。

3.2.1 温度逆転層の測定

上層のある高さまで高度の増加に伴つて大気温度が上昇する現象があり、これを温度逆転層と云う。特に高原の盆地、峡谷等の夏の朝、また湖水面、草原上等に現れ、此の場合の伝播は、伝播通路が地表に対し上向きに曲る傾向があり、そのため目的地に到達しなくなる。その他上端境界面附近で対流圏散乱し、Fading が現れたりすることがある。

この顕著な実測例は昭和 28 年 7 月下旬に 3 日間にわたり、日光の中禅寺湖畔立木観音に送信局をおき、中禅寺湖をへだて対岸の菖蒲ヶ浜にて夏の朝（日出前 15 分頃より日出後 40 分間位）受信不能となり、この時湖岸の高山へ約 70 米程昇ると急に感度が増し、時間の経過とともに最大感度域が下方に下り、日出後約 40 分で平常に復するのが認められた。

（註） 周波数 53 Mc, 出力 0.7 W

3.2.2 谷風、山風の転換期

夏山では夜間は山から谷へ風が吹き下し、日中は谷から山へ風が吹き上るのが一般である。これが日出後、日没後の風向転換時にかなり顕著な Fading を生ずることが測定された。これは昭和 27 年 8 月に約 7 日間にわたりかなり明確に受信されている。

送信点：針の木岳頂上、受信点：立山、浄土山頂上附近、周波数：52.5 Mc, 出力：0.7 W.

3.2.3 ガス発生点、消滅点

雲の発生を見ると、上昇気流によつて一定の高度で発生し、下降気流区域では一定の高度にて消滅する現象がある。これは大体しばらくの間一定の高度を保っており、高瀬溪谷における谷間反射の測定中に伝播路がその附近の高度を水平に横切るとき、比較的早い周期の Fading の生ずるのが測定された。

3.2.4 雷雲中における Fading

雷雲中は非常に強い上昇気流があり、大気の密度分布は大混乱を呈しているため、この中を通過する超短波が非常な影響を受けることは容易に想像される。しかし、雷雲接近時にはアンテナへの落雷等の危険のため実験は不能であり、この実測例はない。

しかし、昭和 29 年 8 月 21 日、台風第 5 号通過後の晴天を利用し、劔岳、三窓・チンネ峰に登攀し頂上直下にてガスに巻かれた。ガス中を登頂し、頂上より三窓のキャンプと連絡中、アンテナの先端からシューという小音と放電が始まった。このときガスは風速約 3 m/sec 程度の北東風によつて流れており、これとともに放電の大きさが時間的に変化した。同時に受信信号強度も 1 サイクル程度で非常に高低の差の大きい（約 60 db 位と予想）Fading を起し、これは三窓キャンプの受信点でも同時に認めている（三窓キャンプ上空は晴）。その約 2 分後に突然閃光と雷鳴を聞き、同時に Fading は無くなり、放電も消滅した（周波数：53 Mc, 出力：0.25 W, アンテナ： $\lambda/4$ ホイップ）。

3.2.5 湖水横断によるフェーディング

日光中禅寺湖および長野県野尻湖、青木湖等にて夏の気温上昇の大きいときに、非常に不規則なる長い周期をもつた Fading があることを認めている。

IV. 波動理論によるアンテナ利得の問題

4.1 最小有効高さ

電界強度の幾何光学的計算が使用できるのは送受信両アンテナが見越し線よりかなり上方にある場合で、アンテナが見越し線に接近するか、またはそれ以下のときには適用できない。C. R. Burrows²¹⁾ は、この条件の場合をも含め、大気中の半波ダイポールによる電界強度として次式を与えた。

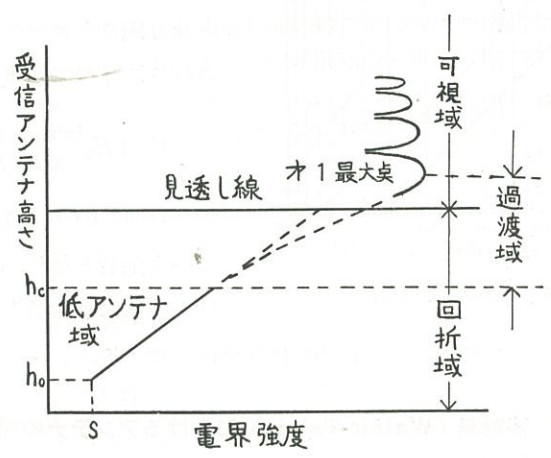
般で
測定
力:

ただし
$$E=2E_0(2\pi\zeta)^{\frac{1}{2}}\left|\sum_{n=1}^{\infty}\frac{e^{-j\tau n\zeta}}{\delta+2\tau n}f_n(h_1)f_n(h_2)\right| \tag{4-1}$$

$\zeta=\left(\frac{2\pi}{\pi k^2 R_0^2}\right)d^{\frac{1}{3}}$
 δ : 大地の複素誘電率に関する変数 τ_n : δ の関数
 $f_n(h_1), f_n(h_2)$: アンテナ高の関数 k : $4/3$

の
質
]

式の各項はそれぞれ異つた伝播モードを示し、とくに干渉域では n をかなり大きい値まで求めねばならない(ここは幾何光学で算出してよい)。次に受信アンテナ高さ対電界強度の関係を図示すると第 44 図のようになる。



第 4 4 図

アンテナが地表から h_0 までの高さの範囲では、地表波の影響で電界強度の変化がない。この h_0 を最小有効高さとい、次式で表す。¹¹⁾

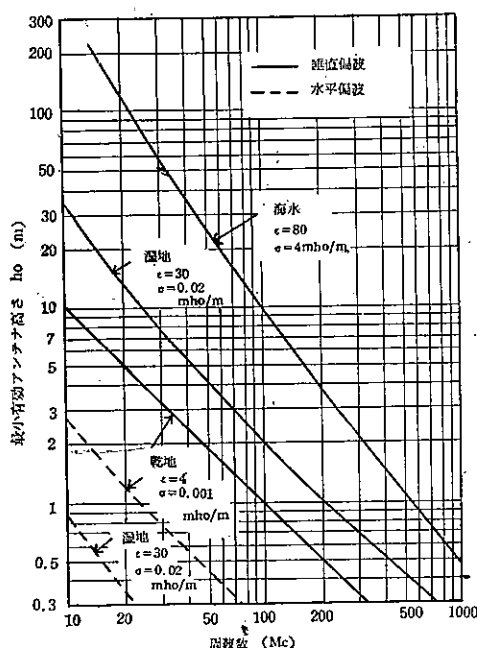
$$\left. \begin{aligned} h_0 &\doteq \frac{\lambda}{2\pi} \left| \sqrt{\epsilon - j60\sigma\lambda} \right| && \text{垂直偏波} \\ &\doteq \frac{\lambda}{2\pi} \left| \frac{1}{\sqrt{\epsilon - j60\sigma\lambda}} \right| && \text{水平偏波} \end{aligned} \right\} \tag{4-2}$$

(4-2) より垂直偏波で波長が長く大地の導電率が大いとき h_0 が高いことがわかる。第 45 図に周波数と最小有効高さとの関係を示す。

4.2 アンテナ限界高さ

第 44 図においてアンテナを h_0 より高くすると電界強度が高さに比例して大きくなる範囲があり、その上限 h_c は

$$h_c=30\lambda^{\frac{2}{3}} \tag{4-3}$$



第45図 最小有効アンテナ高さ

大地では前に算出した (2—9) と (4—5) は完全に一致する。

4.3 移動局 (Walkie-Talkie) におけるアンテナの問題

従来、山岳地等に用いる可搬形のアンテナには $\lambda/4$ ホイップが一般とされ、寸法上 80 Mc 以下には $\lambda/2$ グブレットは用いられない。また水平面内無指向性とするため、一般には垂直偏波が用いられている。ビームアンテナその他の高利得アンテナは固定局用には軽量で構造簡単なるものが使用可能であるが、可搬用としては一般的でない。

またアンテナの高さは、アンテナが機器に直接取り付けられる場合が多く、従つてその高さは人の肩程度 (1.3 m 位) が一般値とみてよいので、電界強度の算出に際し常にそのアンテナ高さは、筆者等の経験上低アンテナ域として取扱うことが無難である。

V. 結 言

以上、山岳地形を伝播路とする比較的近距离の超短波電波の伝播特性について、過去 9 年間の測定結果をもとに総合した次第であるが、我々はこの問題について更に不明の点のあまりに多いのに驚き、測定の不備の点の多いことを痛感している。しかし、現在この方面に用いられる需要面は急増しているにもかかわらず、山岳地伝播の問題に取り組む研究者は特殊の環境にあるもののみに限られ、まだ十分の解析がなされていない現

となり、 h_c までを低アンテナ域、 h_c を限界高さと呼ぶ。

h_c から上は過渡域となり、Fresnel zone の第 1 mode までをこう呼び、この間の電界は大体指数函数的に増加する。偏波と波長と大地定数が与えられると

$$E = 2E_0 \cdot F(d) f(h_1) \cdot f(h_2) \quad (4-4)$$

となり距りとアンテナ高の函数に分離される。従つて過渡域では

$$E = \left(E_0 \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda d} \right) \phi \quad (4-5)$$

で (4—4) の $f(h_1), f(h_2)$ は h_1, h_2 の一次函数となり、 ϕ を大地が不完全球面導体による損失項とすると、平面

況であり、今後も更にこの方面の研究を行つてゆきたいと思つている。

最後に本研究のため多くの援助を賜つた、友人、田中正智君を始めとする本学学生諸君、および機器を提供下さつた各位に深甚の謝意を表するとともに、本年（昭和32年）6月2日不幸谷川岳にて遭難死された、初期よりの研究協力者、故 村松豊一郎君の霊に此の一文を捧げる。

文 献

- 1) C. R. Burrows: "Radio propagation over plane earth-field strength curves." B. S. T. J. Vol. 16, pp. 45-75, Jan. 1947.
- 2) M. C. Gray: "The Diffraction and Reflection of a horizontally polarized electromagnetic wave over a spherical earth." Phil Mag. Vol. 27, pp. 421-436, Apr. 1939.
- 3), 8), 13) K. Bullington: "Radio Wave Propagation at Frequencies above 30 Mc." P. I. R. E. Vol. 35, No. 10, pp. 1122-1136. Oct. 1947.
- 4), 9), 14), 17) 松尾: "超短波伝播" コロナ社, 1950.
- 5) 芳野, 村木: "マナスル登山における通信系統" 電通学会誌, Vol. 39, No. 11. (31-11).
- 6) 槻, 村木, 松村, 芳野: "ヒマラヤ登山と無線電話機" 東芝レビュー, Vol. 11, No. 11. pp. 1216-1226, (31-11).
- 7) 芳野, 村木: "マナスル登山のための通信回線的设计と極寒地用通信機についての研究" 電通大学報, No. 8, pp. 227-278. 1956.
- 10), 11) 日本電波協会: "無線工学ハンドブック" オーム社.
- 12) J. C. Shelleng, C. R. Burrows, and E. B. Ferrell: "Ultra-Short Wave Propagation." P. I. R. E. Vol. 21, No. 3, pp. 427-463. B. S. T. J. Vol. 12, No. 2, pp. 125-161. Apr. 1933.
- 15) 河野, 上杉, 平井: "超短波の山岳による遠距離通信" 電通学会誌, Vol. 38, No. 1. (30-01).
- 16) 河野, 錦織, 上杉, 平井: "超短波の山岳回折遠距離通信" 電通学会誌, Vol. 39, No. 05. (31-05).
- 17) 鈴木: "TV波多重山岳伝播における等価単一山の回折" 昭 31. 連大 547.
- 18), 20) 鈴木: "TV波伝播における Sliding wave について" 昭 30. 連大 590.
- 19) 松尾: 通研月報 (1949, 8-9).
- 21) C. R. Burrows & S. S. Attwood: "Radio wave propagation." (1949).
- 22) K. Bullington: "Reflection Coefficients of Irregular Terrain." P. I. R. E. Vol. 42. No. 8, Aug. 1954.
- 23) W. S. Ament: "Toward a theory of reflection by a rough surface." P. I. R. E. Vol. 41, No. 1, pp. 142-146; Jan. 1953.